



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

NÁVRH KYSLÍKOVÉHO FILTRU DO 3D TISKÁRNY KOVU

DESIGN OF OXYGEN FILTER FOR 3D METAL PRINTER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Martin Ondra

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Suchý

BRNO 2020

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav konstruování
Student: **Martin Ondra**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Jan Suchý**
Akademický rok: 2019/20

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Návrh kyslíkového filtru do 3D tiskárny kovu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Výroba komponent 3D tiskem kovu probíhá za přítomnosti inertní atmosféry kvůli zamezení nežádoucích reakcí taveniny s okolní atmosférou. Hořčíkové slitiny ale během procesu tavení uvolňují kyslík, který je na jejich strukturu navázaný. Tím postupně narušují inertní prostředí výrobní komory. Z toho důvodu je nutné neustále zaplavovat výrobní stroj stlačeným argonem, který vytlačuje kyslík z výrobní komory ven. Toto opatření však vede k řadě parciálních problémů. Vřazením modulu do oběhu inertní atmosféry, který dokáže účinně vyvázat částice kyslíku, by se stal proces výroby stabilnější.

Typ práce: vývojová – konstrukční

Cíle bakalářské práce:

Hlavním cílem je navrhnout modul redukující nárůst hladiny kyslíku během tisku Mg slitin ve výrobním prostoru 3D tiskárny SLM280HL v1.0.

Dílčí cíle bakalářské práce:

- definice problémů,
- návrh variant řešení,
- 3D model modulu,
- výkres sestavy.

Požadované výstupy: průvodní zpráva, výkres sestavení, digitální data.

Rozsah práce: cca 27 000 znaků (15 – 20 stran textu bez obrázků).

Časový plán, struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

<http://ustavkonstruovani.cz/texty/bakalarske–studium–ukonceni/>

Seznam doporučené literatury:

CZERWINSKI, Frank. The oxidation behaviour of an AZ91D magnesium alloy at high temperatures. 2002, 50, 2639–2654.

DREIZIN, Edward L., Charles H. BERMAN a Edward P. VICENZI. Condensed-phase modifications in magnesium particle combustion in air. Combustion and Flame [online]. 2000, 122(1–2), 30–42. ISSN 00102180. Dostupné z: doi:10.1016/S0010-2180(00)00101-2.

PRASAD, Arvind, Zhiming SHI a Andrej ATRENS. Influence of Al and Y on the ignition and flammability of Mg alloys. Corrosion Science [online]. 2012, 55, 153–163. ISSN 0010938X. Dostupné z: doi:10.1016/j.corsci.2011.10.014.

ZONG, Fujian, Chunzhan MENG, Zhiming GUO, Feng JI, Hongdi XIAO, Xijian ZHANG, Jin MA a Honglei MA. Synthesis and characterization of magnesium nitride powder formed by Mg direct reaction with N₂. Journal of Alloys and Compounds [online]. 2010, 508(1), 172–176. ISSN 09258388. Dostupné z: doi:10.1016/j.jallcom.2010.07.224.

SALEHI, Mojtaba, Saeed MALEKSAEEDI, Hamidreza FARNOUSH, Mui Ling Sharon NAI, Ganesh Kumar MEENASHISUNDARAM a Manoj GUPTA. An investigation into interaction between magnesium powder and Ar gas: Implications for selective laser melting of magnesium. Powder Technology [online]. 2018, 333, 252–261. ISSN 1873328X. Dostupné z: doi:10.1016/j.powtec.2018.04.026.

ZHANG, Baicheng, Hanlin LIAO a Christian CODDET. Effects of processing parameters on properties of selective laser melting Mg–9%Al powder mixture. Materials & Design [online]. 2012, 34, 753–758. ISSN 02613069. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2011.06.061.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

V medicínských oborech se běžně využívají slitiny na bázi titanu, avšak v některých medicínských aplikacích se jako vhodnější ukázalo použití slitin na bázi hořčíku. Například v ortopedii pro výrobu implantátů. Zvládnutí zpracování hořčíku pomocí technologie Selective Laser Melting by umožnilo vyrobit komplexní struktury podporující tvorbu buněk a regeneraci kostí. Jeden z problémů při zpracování slitin na bázi hořčíku je tvorba zbytkového kyslíku. Tento problém lze řešit kyslíkovým filtrem, který se vřadí do okruhu inertní atmosféry. Konstrukcí tohoto filtru pro 3D tiskárnu kovu SLM Solutions 280^{HL} v1.0. se zabývá tato bakalářská práce. Toto zařízení umožňuje filtrovat až 120 m³/h plynu s výstupní čistotou ≤ 100 ppt ($1,0 \times 10^{-8}$ %). Zařízení separuje kyslík nepřetržitě během celého výrobního procesu. Konstrukce zařízení umožňuje připojení i k dalším strojům společnosti SLM Solutions.

KLÍČOVÁ SLOVA

Selective Laser Melting (SLM), hořčík (Mg), separace kyslíku (O₂), aditivní technologie, zbytkový kyslík

ABSTRACT

In medical branches alloys on the basis of titanium are commonly used, however, in some of the medical applications it emerged that the usage of alloys on the basis of magnesium is more convenient, for example in orthopaedic surgery for the implant fabrication. Managing of processing of magnesium using the technology Selective Laser Melting would enable to produce complex structures supporting the production of cells and recovery of bones. One of the problems when processing the alloys on the basis of magnesium is the production of residual oxygen. This problem can be solved with the usage of an oxygen filter that is integrated in the circuit of inert atmosphere. This bachelor's work deals with the construction of this filter for 3D metal printer SLM Solutions 280^{HL} v1.0. This device enables to filter up to 123 m³/h of the gas with the output purity ≤ 100 ppt ($1,0 \times 10^{-8}$ %). The device separates oxygen continuously during the whole manufacturing process. The construction of the device enables the attachment to other SLM Solutions company machines.

KEYWORDS

Selective Laser Melting (SLM), magnesium (Mg), oxygen separation(O₂), additive technology, residual oxygen

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ONDRA, Martin. *Návrh kyslíkového filtru do 3D tiskárny kovu* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-06-20]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124335>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí práce Jan Suchý.

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval panu Ing. Janu Suchému za odborné vedení bakalářské práce, za jeho čas, ochotu a trpělivost. V neposlední řadě patří velké díky mé rodině, přátelům a kolegům za jejich podporu a silnou oporu během celého studia.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, pod odborným vedením pana Ing. Jana Suchého. Současně prohlašuji, že všechny zdroje obrazových a textových informací, ze kterých jsem čerpal, jsou řádně citovány v seznamu použitých zdrojů.

.....

Podpis autora

OBSAH

1	ÚVOD	15
2	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	16
2.1	Technologie Selective Laser Melting (SLM)	16
2.1.1	Proces stavby dílu	17
2.1.2	Zpracování hořčíku pomocí technologie SLM	18
2.1.3	Procesní parametry ovlivňující kvalitu zpracování technologií SLM	19
2.1.4	SLM Solutions 280 ^{HL} v1.0	19
2.3	Narušování inertní atmosféry během výrobním procesu	21
2.3.1	Hořčíkový prášek	21
2.3.2	Princip oxidace hořčíku za zvýšených teplot	22
2.3.3	Reakce hořčíku s kyslíkem obsaženém v inertní atmosféře	23
2.3.4	Princip vzniku kyslíku během výrobního procesu	24
2.4	Separace kyslíku	25
2.4.1	Membrána Prism	25
2.4.2	Kyslíková past	27
3	ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	28
3.1	Hlavní cíl práce	29
3.2	Dílčí cíle práce	29
4	KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ	30
4.1	Koncept 1	30
4.2	Koncept 2	31
4.3	Koncept 3	32
4.4	Analýza rizik	33
4.4.1	Hodnocení rizik konceptu 1	34
4.4.2	Hodnocení rizik konceptu 2	35
4.4.3	Hodnocení rizik konceptu 3	36
5	KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ	37
5.1	Provozní parametry zařízení SLM Solution 280 ^{HL} v1.0	37
5.2	Umístění kyslíkového filtru do stávajícím systému SLM Solution 280 ^{HL} v1.0	37
5.3	Konstrukční řešení kyslíkového filtru	38
5.3.1	Napouštění inertní atmosféry	39

5.3.2	Filtrace zbytkového kyslíku	40
5.3.3	Výměna vyčerpané kyslíkové pasti	41
5.4	Volba normalizovaných konstrukčních prvků	42
5.4.1	Volba potrubních prvků	42
5.4.2	Volba ventilů	45
5.4.3	Volba senzoru kyslíku	47
5.4.4	Volba rychlospojky	48
5.4.5	Volba kyslíkové pasti	48
5.4.6	Volba řídicího systému	49
5.5	Návrh řídicího programu v Logo!Soft Comfort v8.2	50
5.5.1	Mód napouštění inertní atmosféry	51
5.5.2	Mód filtrace zbytkového kyslíku	52
5.5.3	Mód výměny vyčerpané kyslíkové pasti	53
5.6	Nenormalizované konstrukční prvky	54
5.6.1	Dvojitý T-kus	54
5.6.2	Konfuzor	55
5.6.3	Difuzor	56
5.6.4	Přechodka	57
5.7	Kontrola celkových tlakových ztrát	57
6	DISKUZE	59
7	ZÁVĚR	61
8	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	62
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	67
10	SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	68
11	SEZNAM TABULEK	71
12	SEZNAM PŘÍLOH	72

1 ÚVOD

V současné době stojíme na prahu 4. průmyslové revoluce, která zásadně ovlivňuje povahu průmyslu, energetiky, obchodu a dalších odvětví. Ministerstvo průmyslu a obchodu České republiky v dokumentu „INICIATIVA PRŮMYSL 4.0“ uvedlo: „I když jsou předpokládány dopady této revoluce celospolečenské, v jejím centru pozornosti stojí průmyslová výroba“ [1].

Mezi významné technologie Průmyslu 4.0 patří aditivní výroba [1]. Velkou výhodou aditivních technologií je možnost výroby téměř volných tvarů, které nejsou jinou technologií vyrobitelné [2]. Aditivní technologie obvykle využívají průmysly s vysokou přidanou hodnotou jako je zdravotnický, letecký, automobilní a kosmický průmysl [1]. Významnou roli mezi aditivními technologiemi hraje technologie Selective Laser Melting (SLM) (2.1), která umožňuje rychlé prototypování funkčních dílů [1] [3].

Jak již bylo zmíněno, jedním z průmyslů využívajících aditivní technologie je zdravotnický průmysl. Technologie SLM je zde využívána k výrobě titanových implantátů [4] [5]. Titan ve zdravotnictví našel velké uplatnění, a to díky vysoké pevnosti při zachování nízké hmotnosti a díky biologické kompatibilitě [5]. Titan v těle nedegraduje a zůstává v těle přítomen jako cizí předmět [6]. V důsledku to může u pacienta způsobit infekce, podráždění a lokální záněty [6]. Z těchto důvodů se ortopedii [7] [8], kardiologii [8] a dalších oborech jeví jako výhodnější použít slitiny na bázi hořčíku [8]. Hlavní výhodou těchto slitin je jejich biologická odbouratelnost [6] [8]. Zároveň se ukázalo, že slitiny na bázi hořčíku mají obdobné mechanické vlastnosti jako kosti [6] [8]. Zvládnutím zpracování hořčíku pomocí technologie SLM bychom dosáhli možnosti tvorby komplexních struktur podporující tvorbu buněk a regeneraci kostí [6]. Zároveň degradací hořčíkových struktur je umožněno vyživovat okolní tkáň, kde zbytkový hořčík je vyloučen z těla v podobě moči [9]. V neposlední řadě se pacient vyhne další reoperaci [6] [7] [8] [9].

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

2.1 Technologie Selective Laser Melting (SLM)

Slovní spojení „Laser Melting“ znamená, že je prášek roztaven a zdrojem tepla je laser. Slovo „Selective“ naznačuje, že při výrobním procesu jsou taveny vybrané oblasti naneseného prášku.

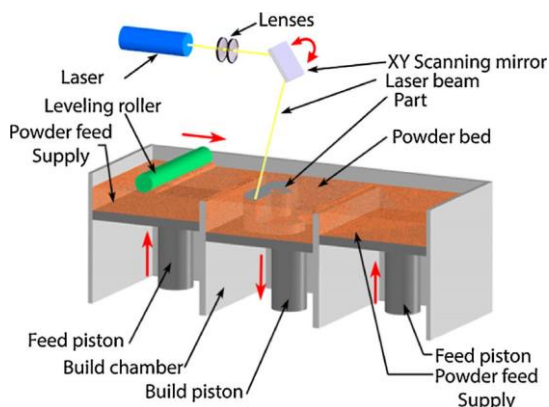
Technologii Selective Laser Melting vyvinul Dr. W. Meiners, Dr. K. Wissenbach a Dr. G. Andres z Fraunhoferova institutu pro laserové technologie ve spolupráci s Dr. M. Fockele a Dr. D. Schwarze ze společností Fockele a Schwarze (F&S) [3]. Patent byl podán v roce 1997 u německého úřadu pro patenty a ochranné známky a v následujícím roce byl tento patent zveřejněn [3].

Výzkum materiálů vhodných pro zpracování technologií SLM byl zaměřen na slitiny na bázi oceli a titanu (Ti). Mezi lety 1999 až 2014 58 % všech publikací, týkajících se výzkumem materiálů vhodných pro zpracování SLM, se týkalo těchto materiálů [3]. To bylo především způsobeno uplatněním v průmyslových odvětvích, jako je letecký a medicínský průmysl [3]. Od roku 2009 byl zaznamenán nárůst publikací týkajících se ostatních kovů. Zejména se jednalo o slitiny na bázi hliníku (Al), niklu (Ni), hliníku (Al), dále také slitiny na bázi hořčíku (Mg), mědi (Cu), wolframu (W) a další [3] [10]. V současné době technologie SLM stále umožňuje zpracování úzké skupiny materiálů v porovnání s konvenčními technologiemi, což je považováno za hlavní nevýhodu technologie SLM [3].

2.1.1 Proces stavby dílu

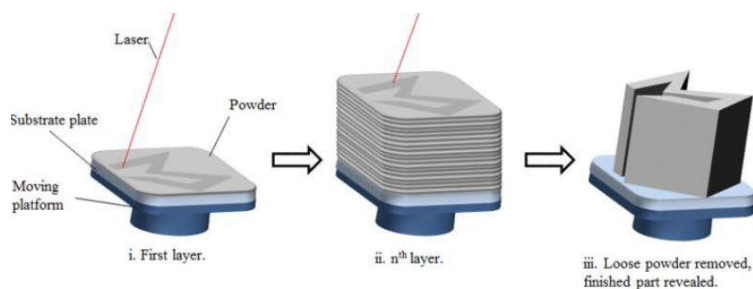
V prvním kroku je nutné připravit data z CAD modelu. Dle těchto dat je v jednotlivých vrstvách vygenerována dráha laseru. Proces, kdy laser následuje vygenerované dráhy, nazýváme skenování.

Samotná stavba dílu začíná rovnoměrným nanesením kovového prášku na stavební píst. Velikost jednotlivých vrstev se pohybuje od 20 μm do 100 μm [3]. Pro roztavení materiálu používáme lasery s vysokou hustotou energie $(1,27-7,84) \times 10^9 \text{ J/m}^2$, který zcela roztaví materiál podél vybraných oblastí [3] [11] [12].



obr. 2-1 Schéma Technologie Selective Laser Melting (SLM) [3]

Jakmile je laserové skenování dokončeno, píst se spustí o tloušťku vrstvy a celý proces se opakuje. Proces stavby dílu je časově náročný, může trvat i několik hodin, záleží na složitosti součástky [3]. Po dokončení všech vrstev je nadbytečný prášek odstraněn a hotový díl vyjmut z pracovního prostoru.



obr. 2-2 Schéma vrstvení materiálu během stavebního procesu [3]

K výrobnímu procesu dochází v přísně regulované atmosféře [3]. Pracovní komora je vyplněna inertním plynem, který má zabránit oxidaci. Jako inertní plyn se obvykle používá argon, a to díky o řád vyšší inertní schopnosti v porovnání s dusíkem [3]. Dalším důvodem je vyšší hmotnost argonu, což umožňuje dosáhnout koncentrace kyslíku nižší než 0,01 % [3] [12]. Takto nízkých koncentrací kyslíku je třeba dosáhnout zejména u velmi reaktivních materiálů jako je titan (Ti) a hořčík (Mg).

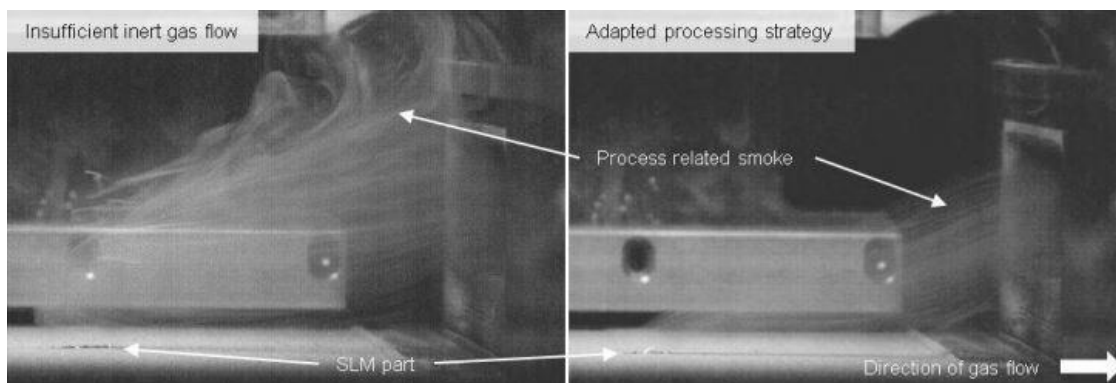
2.1.2 Zpracování hořčíku pomocí technologie SLM

První studie o zpracování hořčíku (Mg) byla publikována v roce 2010 skupinou okolo CC Ng z Hongkongské polytechnické univerzity [13]. Tato skupina se zabývala návarovými hořčíkovými stopami, které dále analyzovala. Jako hlavní problém, při zpracování hořčíku technologií SLM, byla identifikována vysoká afinita hořčíku ke kyslíku, jehož koncentrace v pracovním prostoru stroje s časem narůstá [3] [14] [13]. Dalším problémem byla hořlavost použitého prášku [3] [13]. Tyto problémy se jim podařilo vyřešit pomocí „stínícího boxu s cirkulací argonu“ [13]. Cílem bylo minimalizovat spotřebu materiálu při zachování dostatečného krytí místa tavby během stavebního procesu. Box byl neustále proplachován argonem o minimálním tlaku 2 bary, což vedlo ke snížení oxidace povrchu návarových stop [13]. Vybavení jim umožnilo použít maximální výkon laseru 28 W a maximální skenovací rychlost 20 mm/s [13].

V této studii byly vytyčeny základní směry, kterými se další práce ubírají. Jako základní směry vytyčily optimalizaci stínícího boxu, výzkum zóny ovlivněné teplem, optimalizaci procesních parametrů, analýzu mechanických vlastností vyrobených struktur a další [13].

Zpracování ocelí technologií SLM bylo v roce 2010 zvládnuto a existovalo pro něj škála komerčních zařízení. Jak již bylo zmíněno, výzkumníci z Hong Kongské polytechnické univerzity měli k dispozici laser o maximálním výkonu 28 W. Komerční zařízení umožnily použití laseru o výkonu 400 W, 1000 W i více [15] [16]. Použití vyšších výkonů laserů způsobilo vypařování hořčíku, které se projevovalo „černou mlhou“. To se ukázalo jako jeden z hlavních problémů při zpracování hořčíku technologií SLM [17] [18].

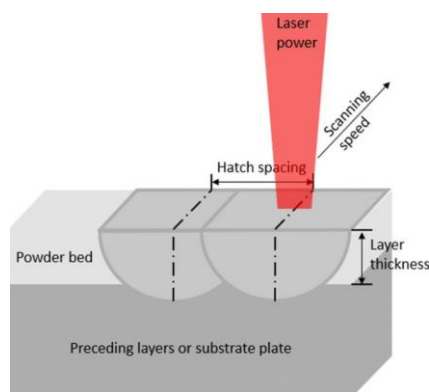
Rozdíl mezi teplotou tání 650 °C [19] a vypařování 1107 °C [19] hořčíku je 457 °C. Což je malý rozsah pro řízené odpařování [18]. Z tohoto důvodu nelze vzniku „černé mlhy“ zcela zabránit. Výpar hořčíku způsobuje dva hlavní problémy: rozptýlení laserového paprsku a jeho částečnou absorpci [17] [18]. To má za následek ztížení řízení procesních parametrů (2.1.3), které přímo ovlivňují kvalitu zpracování výrobku [3] [18]. V roce 2016 Lucas Jauer a kol. navrhl optimalizaci proudění inertní atmosféry, což vedlo k odstranění hořčíkových výparů z pracovní komory stroje (obr. 2-3) [18].



obr. 2-3 Proudění inertní atmosféry před optimalizací (nalevo) a po optimalizaci (napravo) [18]

2.1.3 Procesní parametry ovlivňující kvalitu zpracování technologií SLM

Procesní parametry přímo ovlivňují výslednou kvalitu zpracování. Nastavitelných parametrů je velké množství a na toto téma bylo realizováno mnoho studií. Z těchto studií vyplynulo, že největší vliv na kvalitu zpracování má výkon laseru, rychlost skenování, rozestup jednotlivých šrafu a tloušťka vrstvy (obr. 2-4) [3] [17].



obr. 2-4 Nejdůležitější parametry ovlivňující výrobní proces [1]

Výše zmíněné parametry mají vliv na hustotu energie přivedené do místa tavby [3]. Jednotlivé parametry je nezbytné upravit dle zpracovávaného materiálu. Díky tomu dosáhneme požadovaných fyzikálních i chemických vlastností výsledného produktu. Mezi nejdůležitější sledované vlastnosti patří: relativní hustota materiálu, únavová pevnost, mikrostruktura a další.

2.1.4 SLM Solutions 280^{HL} v1.0

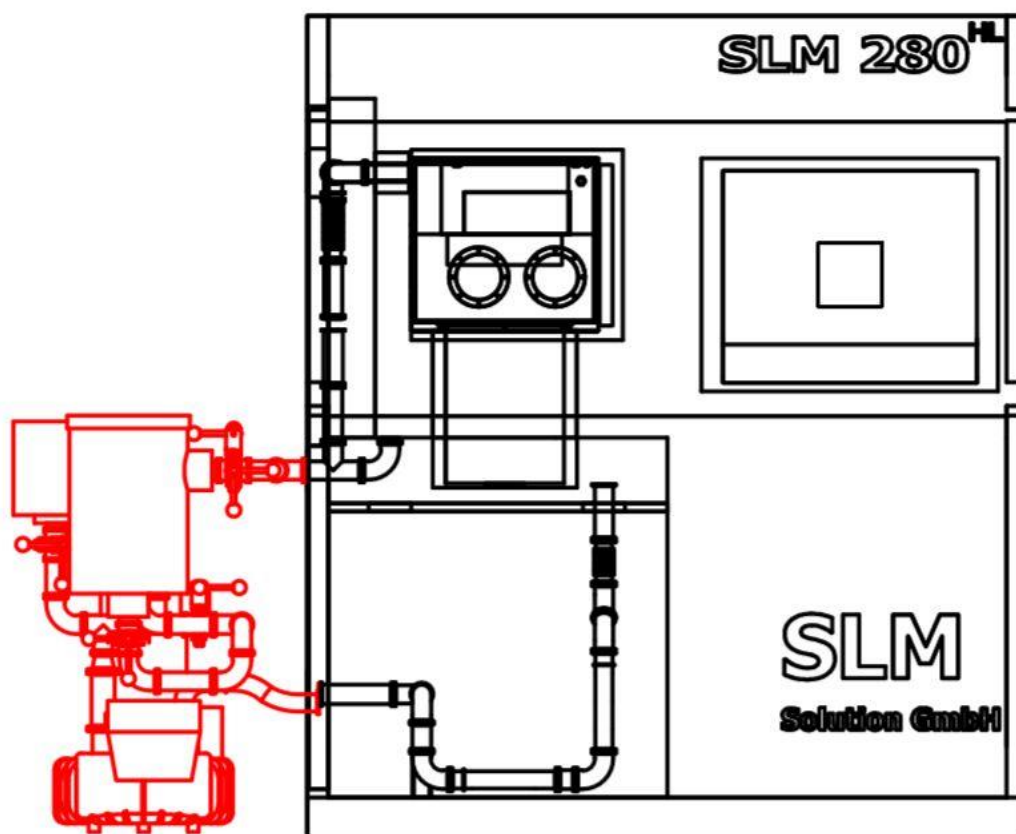
Konstrukce modulu bude navržena pro SLM Solution 280^{HL} v1.0 od firmy SLM Solution. Tento stroj na ústavu konstruování FSI v Brně prošel úpravami, které mají za cíl optimalizovat konstrukci vhodnou ke zpracování různých slitin, včetně těch na bázi hořčíku. Stroj disponuje Ng-YAG (1060 nm) laserem o výkonu 400 W („singl optics“) [20]. Jako inertní plyn je používán argon o čistotě 99,9999 % [20]. Do okruhu, který slouží k cirkulaci argonu, byl vřazen spalínový filtr. Spalínový filtr slouží k čištění argonu od spalín vznikajících v komoře při výrobním procesu [20]. Čištění argonu od kyslíku není zatím řešeno [20]. V současné době probíhá výzkum úpravy konstrukce pracovní komory, tak aby bylo docíleno lepšího odvodu hořčíkových výparů (2.1.2) [18] [20].

tab. 2-1 Tabulka vybraných technických parametrů zařízení SLM 280^{HL} [15] [16] [20]

Vybrané technické parametry zařízení SLM 280 ^{HL}		
Parametr	Hodnota	Jednotka
Stavební rozměry (x*y*z)	280x280x350	[mm]
Výkon laseru	400	[W]
Stavební rychlost	až 113	[cm ³ /h]
Tloušťka vrstvy	20-75	[μm]
Minimální tloušťka stěny	150	[μm]
Operační paprsek	80-115	[μm]
Skenovací rychlost	10	[m/s]
Spotřeba inertního plynu v provozu	5	[l/min]

Současná úprava SLM Solutions 280^{HL} v1.0 na FSI VUT v Brně

Pro potřeby FSI VUT v Brně byl vyvinut spalínový filtr (verze 2), který je umístěn z levé strany zařízení. Ve schématu je zobrazen červenou barvou.



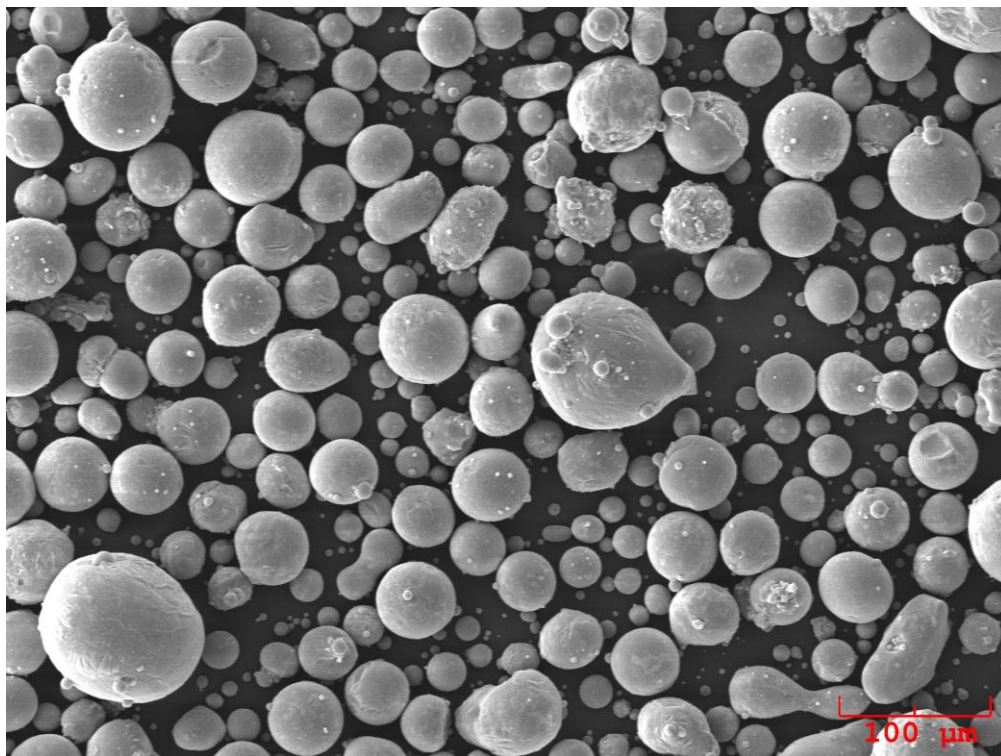
obr. 2-5 Schéma současného uspořádání zařízení SLM Solution 280^{HL} v1.0 na FSI VUT v Brně, spalínový filtr (červená)

2.3 Narušování inertní atmosféry během výrobním procesu

Pro návrh optimální konstrukce modulu umožňujícího separaci kyslíku od argonu je důležité pochopit reakci kyslíku s hořčíkovými slitinami v inertní atmosféře, princip vzniku kyslíku ve stavební komoře během výrobního procesu a princip oxidace hořčíku za zvýšených teplot.

2.3.1 Hořčíkový prášek

Vstupní surovinou technologie SLM je prášek. Prášky se vyrábí atomizací a mechanickým drcením [21]. Mechanické drcení není vhodné pro technologii SLM, a to díky produkci částic o různé velikosti. Atomizovaný prášek se vyrábí z taveniny, která je rozprášena pod inertní atmosférou [21]. Výsledkem je prášek kulovitěho tvaru o velikosti částic (20-160) μm [21]. Kvůli bezpečnosti a snadné manipulaci se prášek používá v pasivovaném stavu [20] [21].



obr. 2-6 Kulovitý tvar částic atomizované hořčíkové slitiny WE43C [21]

Pasivační vrstva je hlavním zdrojem růstu kyslíku v okruhu inertní atmosféry. Je tedy nutné pochopit princip obnovy pasivační vrstvy za zvýšených teplot.

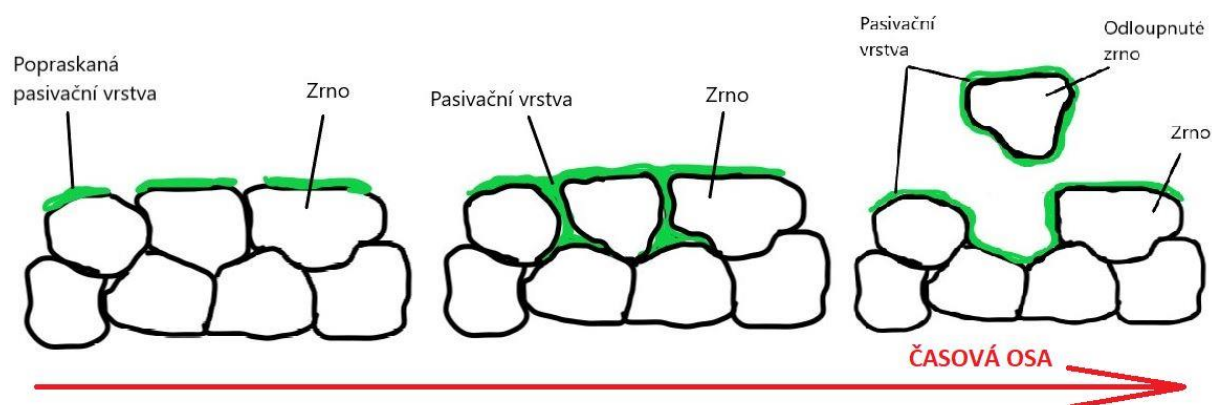
2.3.2 Princip oxidace hořčíku za zvýšených teplot

Diametrálně odlišné vlastnosti hořčíků a oxidů, které tvoří pasivační vrstvu, neumožňují jejich pevné spojení (tab. 2-2) [22]. Jedním z oxidů je oxid hořečnatý (MgO).

tab. 2-2 Vybrané fyzikální vlastnosti hořčíku (Mg) [23] a oxidu hořečnatého (MgO) [24] [25]

	Hořčík (Mg)	Oxid hořečnatý (MgO)
Teplota tání [°C]	649	2800
Teplota varu [°C]	1090	3600
Součinitel teplotní roztažnosti (pro 20 °C) [$\cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$]	26	10,8

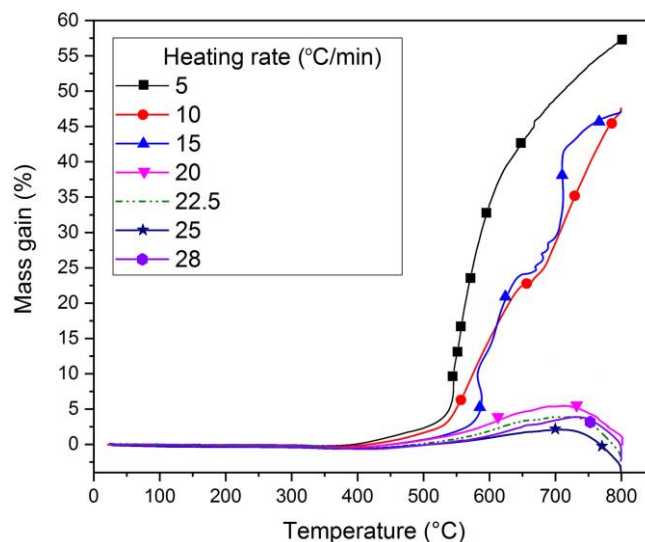
S narůstající teplotou má pasivační vrstva tendenci praskat [22]. To je způsobeno odlišnou teplotní roztažností hořčíku a oxidů (tab. 2-2). Vzniklé trhliny odhalují základní materiál, který rychle reaguje s kyslíkem obsaženým v inertní atmosféře (2.3.3) [14]. To má za následek šíření koroze podél hranice zrn. Kolem jednotlivých zrn se zoxidovaný povrch zvětšuje a při dosažení kritické velikosti dochází k odlupování těchto zrn [22]. Dojde tedy k odhalení nových zrn. Celý proces se neustále opakuje a nelze mu zcela zabránit. Jednotlivé cykly se s rostoucí teplotou zrychlují [22]. Exponenciální nárůst rychlosti koroze hořčíkových slitin se objevuje kolem teploty 450 °C [22].



obr. 2-7 Časový vývoj oxidace hořčíku za zvýšených teplot

2.3.3 Reakce hořčíku s kyslíkem obsaženém v inertní atmosféře

V roce 2018 byla studována interace mezi hořčíkovým práškem a inertní argonovou atmosférou. Tato studie zkoumala interaci hořčíkového prášku a ultra čistého argonu s čistotou 99,9999 % [14].



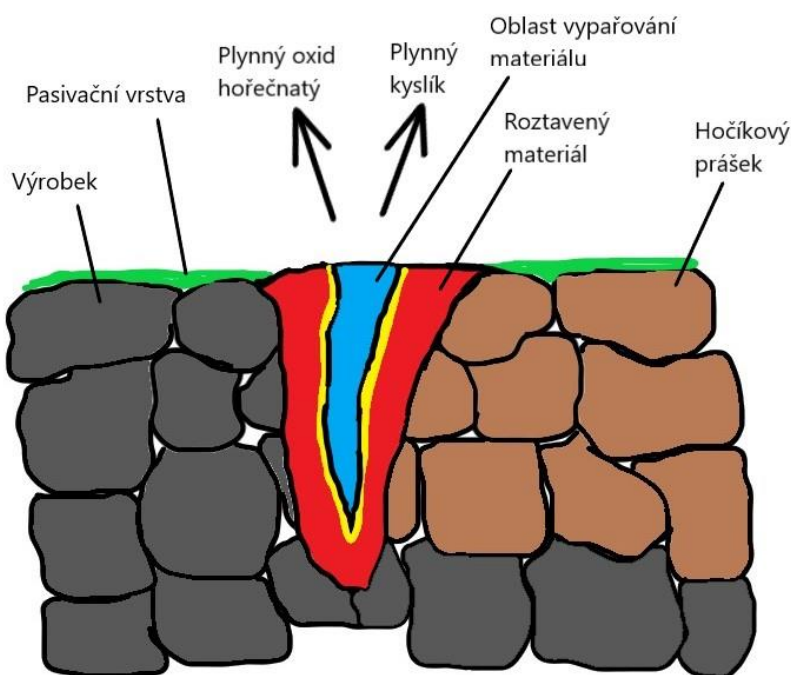
obr. 2-8 Graf závislosti hmotnostního přírůstku a teploty [13]

V grafu lze pozorovat křivky popisující vývoj hmotnostního přírůstku během lineárního zahřívání hořčíkových prášků, chráněných argonovou atmosférou. V grafu jsou patrné dva trendy, které do 400 °C vykazují zanedbatelnou změnu hmotnosti [14]. Teplota tání hořčíku je 650 °C [19], tedy při zpracování hořčíku technologií SLM se pohybujeme nad tuto teplotu (2.1). Nad 400 °C nízké rychlosti ohřevu vykazují vysoké hmotnostní přírůstky, nejsou tedy vhodné pro technologii SLM. Při zpracování hořčíku technologií SLM používáme vysoké rychlosti ohřevu [3] [14]. Mírný nárůst hmotnosti mezi teplotou (400-700) °C je přisuzován reakci zbytkového kyslíku, obsaženého v inertní atmosféře, s hořčíkovým práškem za vzniku oxidů [14]. Při zvýšení teploty nad 700 °C je patrný pokles hmotnosti. Tento jev odpovídá jevu výparu hořčíku, který byl diskutován 2.1.2. Je tedy patrné, že použitím ultra čistého argonové atmosféry nelze zabránit oxidaci ani následnému vypařování.

2.3.4 Princip vzniku kyslíku během výrobního procesu

Jak již bylo zmíněno (2.3.2), oxidy jsou charakteristické diametrálně odlišnými vlastnostmi v porovnání s čistým hořčíkem. To je patrné z tabulky (tab. 2-2). Z podstaty technologie SLM, diskutované v 2.1 vyplývá, že je nutné zcela roztavit hořčíkový prášek. Tedy teplota v místě tavby musí překročit teplotu tání oxidů.

Pro roztavení oxidů je nutné použití velkých výkonů laserů [22] [25]. To způsobuje odpařování hořčíku ještě před roztavením pasivační vrstvy. Ve chvíli roztavení pasivační vrstvy dojde k rozbití všech vazeb [12] [22]. Část kyslíku shoří, část se naváže na výpar hořčíku a část je odnesena inertní atmosférou [22]. Poslední zmíněná část způsobuje nárůst kyslíku v okruhu inertní atmosféry.



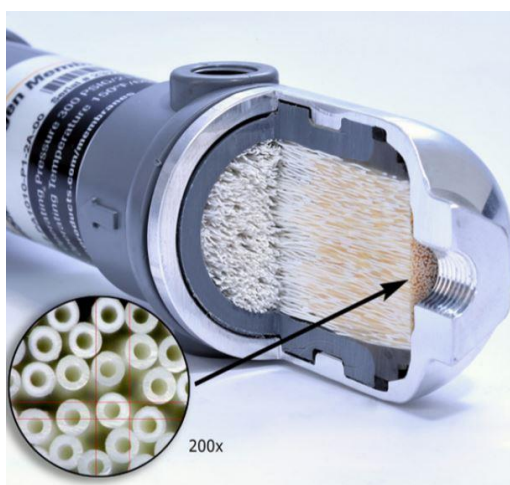
obr. 2-9 Tavný kužel vznikající při působením laseru

2.4 Separace kyslíku

V minulé kapitole byl popsán princip vzniku kyslíku během výrobního procesu. Také byly diskutovány problémy, které tento kyslík způsobuje. Je tedy nutné najít řešení čištění kyslíku z inertní atmosféry, a to během výrobního procesu.

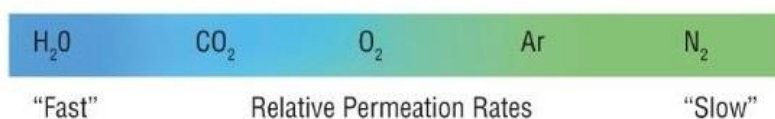
2.4.1 Membrána Prism

Membrány Prism jsou tvořeny svazkem dutých vláken. Těchto vláken může svazek obsahovat i několik tisíc [26]. Jednotlivá vlákna jsou uzavřena do epoxidové pryskyřice. Vlákna jsou na obou koncích otevřená, tak aby plyn mohl cestovat z jedné strany na druhou. Celý vláknový svazek je uzavřen v ochranném krytu, který chrání vlákna před poškozením (obr. 2-10).



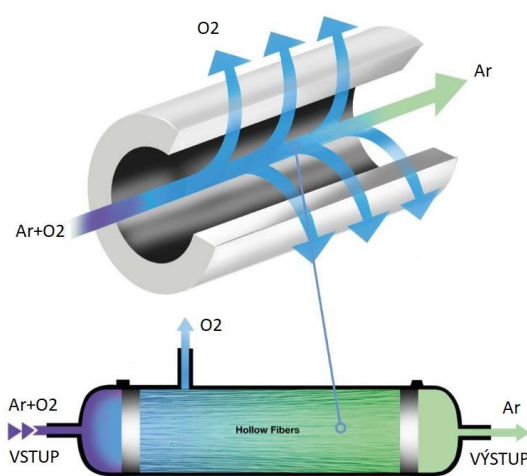
obr. 2-10 Detail struktury Membrány Prism [23]

Membrány Prism využívají principu selektivní propustnosti, kde všechny plyny mají svoji charakteristickou propustnost. Propustnost je schopnost plynu difundovat skrz membránu. Kyslík je „rychlý“ plyn, o argonu hovoříme jako o plynu „pomalém“ (obr. 2-11) [26].



obr. 2-11 Relativní rychlost propustnosti jednotlivých plynů [26]

Plyny řazené do skupiny „rychlé“ mají schopnost difundovat skrz membránu. Plyny řazené do skupiny „pomalé“ cestují podél vnitřní stěny vlákna směrem k výstupu [26]. Hnací silou separace je rozdíl parciálních tlaků plynu na vnitřní a vnější straně vlákna. Směs vstupuje do separátoru za zvýšeného tlaku, který se pohybuje mezi (9-15) bar, záleží na daném typu separátoru [26]. Rychlé plyny a malé množství pomalých plynů difundují skrz membránu a odchází při atmosférickém tlaku ze systému. Pomalé plyny a malé množství rychlých plynů, které nestihnou difundovat, jsou vedeny podél vnitřní stěny a opouštějí separátor jako produkt. Čistota výsledného produktu se pohybuje v intervalu (95-99,5) % [26]. Záleží především na typu separátoru, provozní teplotě a provozním tlaku. Výhodou celého řešení je jeho pasivní funkce, spolehlivost a odolnost.



obr. 2-12 Schéma membránového separátoru PRISM [26]

2.4.2 Kyslíková past

Kyslíkové pasti se používají v aplikacích, které vyžadují čistotu výsledného produktu na úrovni ppt („parts per trillion“, 10^{12}) [27] [28]. Fungují na principu absorpce [27]. Absorpční látka s vysokou afinitou ke kyslíku je v granulovaném stavu uzavřena v hliníkové trubce [27]. Směs plynů vstupuje do pasti, kyslík je vázán na absorpční látku, argon pokračuje skrz past. Po vyčerpání kapacity je nutné past vyměnit [27]. Někteří výrobci nabízejí pasti, které umožňují regeneraci absorbentu [28]. Jedná se tedy o spotřební zboží s omezenou životností.

Velké kyslíkové pasti

Jedná se o tzv. velkou kyslíkovou past. Pod tímto označením výrobci nabízejí kyslíkové pasti s velkou kapacitou. Obvykle mají kapacitu vyčištěného kyslíku 3 litry (3,2g) O_2 [27] [29]. Někteří výrobci nabízí i vyšší kapacity. Tyto kyslíkové pasti neumožňují vizuální indikaci vyčerpání, proto se obvykle zapojují v sérii s indikační kyslíkovou pastí.



obr. 2-13 Velká kyslíková past [26]

Indikační kyslíková past

Princip funkce je stejný jako u velké kyslíkové pasti, avšak součástí konstrukce je skleněná trubice s indikační látkou [27]. Celá funkční konstrukce je umístěna do plastové trubice. Důvodem je zvýšení bezpečnosti. Při selhání skleněné trubice je plynový systém chráněn před únikem do okolní atmosféry [27]. Indikační látka je tvořena mědí, v přítomnosti kyslíku se vytvoří oxid měďnatý (CuO_2) [27]. Nevýčerpaná past má indikační látku zbarvenou do zelena, vyčerpaná past se pak zbarví do šeda [27].



obr. 2-14 Indikační kyslíková past [26]

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

Zpracováním hořčíkových slitin technologií SLM bylo poprvé popsáno v roce 2010 skupina okolo CC Ng z Hongkongské polytechnické univerzity [13]. V této práci byly identifikovány hlavní problémy při zpracování hořčíkových slitin technologií SLM [13]. Hlavním problémem je vysoká afinita kyslíku k hořčíku [3] [13] [14]. Bylo zjištěno, že během zpracování hořčíkových slitin dochází k výparu hořčíku [18]. Tento problém lze řešit úpravou konstrukce pracovní komory [18]. K redukci hořčíkového výparu lze také přispět vyvázáním přebytečného kyslíku z inertní atmosféry [18] [22]. Bylo popsáno, že koncentrace kyslíku během výrobního procesu narůstá [13]. Jako zdroj kyslíku byl identifikován hořčíkový prášek, který se používá v pasivovaném stavu [20] [21] [22] [25]. Při zpracování technologií SLM je tento prášek zcela roztaven, jsou tedy roztaveny i všechny oxidy [3] [10]. Dojde k uvolnění kyslíku, který se částečně váže zpět na hořčík, částečně shoří a zbylý kyslík opouští místo tavby v nevázaném stavu [22]. Tento zbytkový kyslík způsobuje nárůst koncentrace kyslíku v pracovní komoře [22]. To způsobuje další parciální problémy, a proto je nutné tento kyslík separovat.

V praxi se pro separaci kyslíku používá několik metod. Jednou z nich je Membrána Prism [26], která funguje na principu selektivní propustnosti jednotlivých plynů skrz membránu. Membránu tvoří jednotlivá dutá vlákna, která jsou uspořádána do svazku. Hnací silou separace je rozdíl parciálních tlaků na vnitřní a vnější straně dutého vlákna. Velkou výhodou tohoto řešení je pasivní separace kyslíku. Pro naši aplikaci toto řešení není vhodné, jelikož maximální čistota výsledného produktu dosahuje 99,5 %.

Další vhodnou metodou jsou kyslíkové pasti [27], které k separaci využívají látek s vysokou afinitou ke kyslíku. Tato látka je v granulovaném stavu uzavřena do hliníkové trubky. Průchodem směsi skrz Trap je docíleno čistoty produktu až 99,9999 %, což je vhodné zejména pro laboratorní účely, kde je tato metoda nejčastěji používána.

V porovnání s metodou Membrány Prism je docíleno řádově vyšší čistoty výsledného produktu. Nevýhodou oproti Membráně Prism je ztráta pasivní separace. Kyslíkové pasti je nutné po vyčerpání kapacity vyměnit, což zvyšuje provozní náklady.

Problém zvyšování koncentrace kyslíku v inertní atmosféře během zpracování slitin na bázi hořčíku technologií SLM lze řešit separací [26] [27]. Z popsaných metod nejvíce vyhovuje metoda kyslíkové pasti díky vysoké čistotě výsledného produktu. Z tohoto důvodu budou koncepční řešení rozpracována s touto metodou.

3.1 Hlavní cíl práce

Hlavním cílem bakalářské práce je návrh modulu pro SLM Solutions 280^{HL} v1.0, který umožní separaci kyslíku z inertní atmosféry během zpracování hořčíkových slitin. Čistota argonu by měla dosáhnout minimálně 99,9 %.

3.2 Dílčí cíle práce

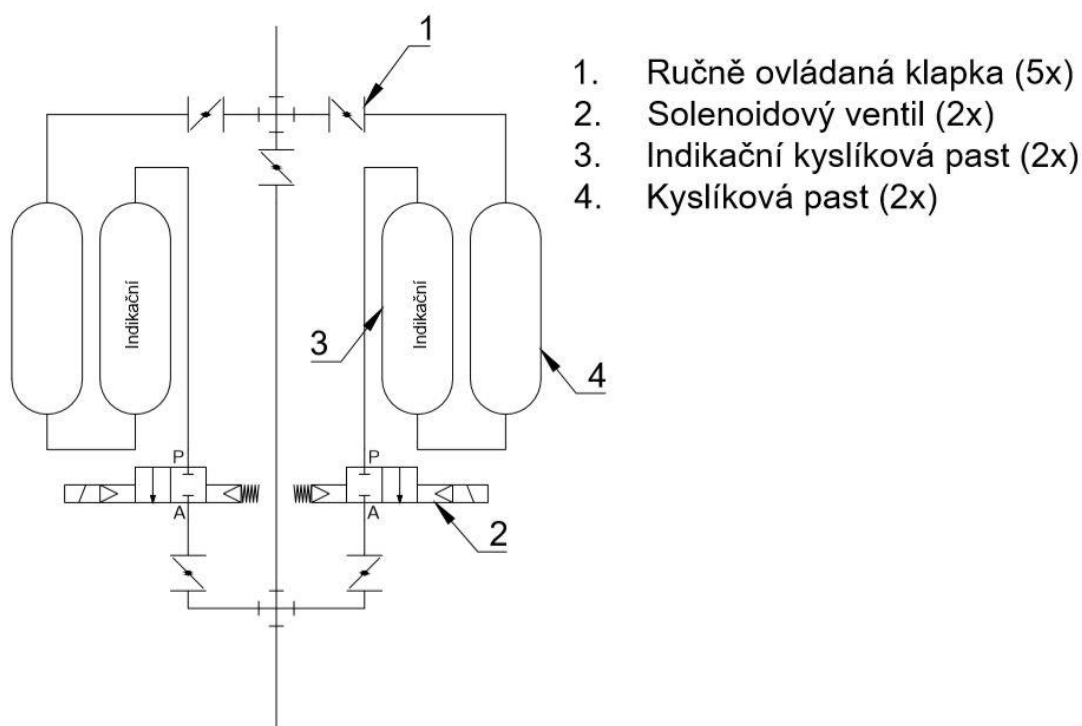
- 3D návrh modulu
- výkres sestavy modulu
- možnost práce 3D tiskárny bez separátoru kyslíku

4 KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ

Jednotlivá řešení disponují společnými prvky. Všechna řešení se skládají ze tří větví. První větev slouží k napouštění inertní atmosféry. Díky této větvi nedojde během napouštění inertní atmosféry k vyčerpání kyslíkové pasti vlivem přítomnosti atmosférického kyslíku v okruhu inertní atmosféry. Další dvě větve obsahují kyslíkové pasti, které slouží k samotnému čištění inertní atmosféry. Vždy pracuje pouze jedna větev, druhá slouží jako záložní pro případ výměny vyčerpané kyslíkové pasti. Díky tomu je zajištěna nepřetržitá činnost kyslíkového filtru i v případě vyčerpání kyslíkové pasti. Tyto větve také obsahují solenoidové ventily, které slouží k „vyfouknutí“ nečistot, které se do větve dostanou během výměny kyslíkové pasti.

4.1 Koncept 1

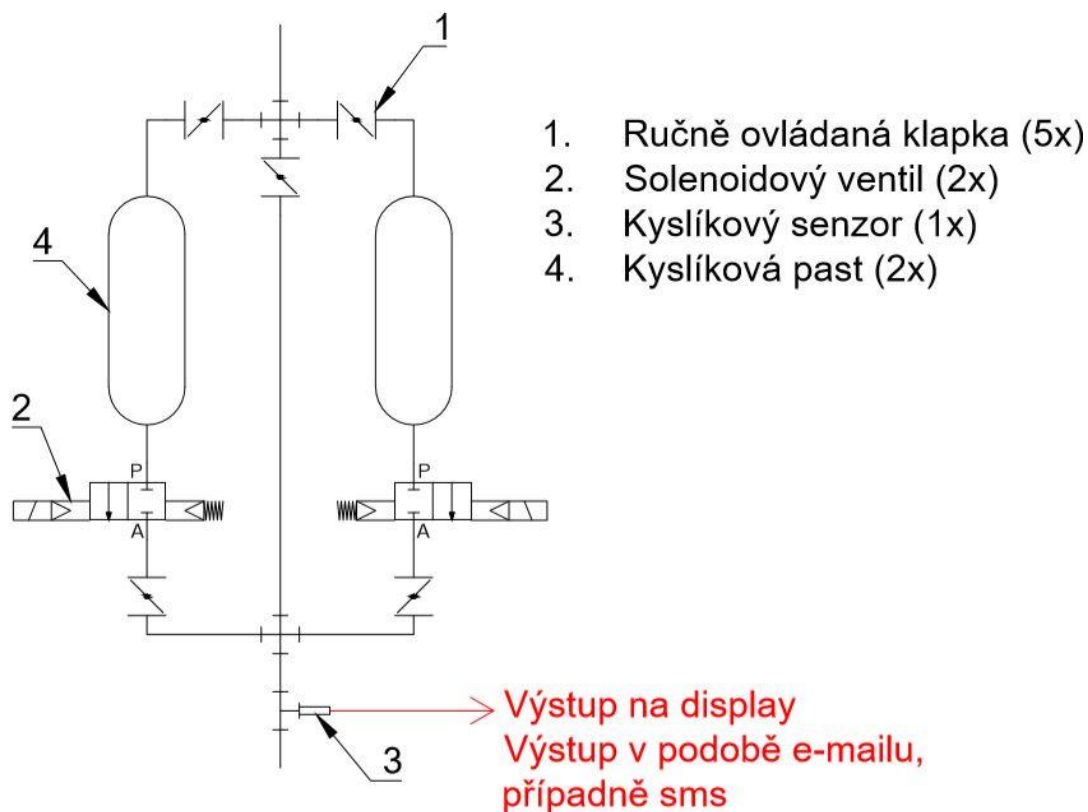
Přepínání mezi jednotlivými větvemi je řešeno klapkami s manuálním ovládáním. V tomto konceptu větve obsahují sériově zapojenou kyslíkovou past a indikační kyslíkovou past. Kyslíková past zajišťuje kapacitu pro samotné čištění, indikační kyslíková past pak slouží ke kontrole vyčerpání kyslíkové pasti. Po vyčerpání kyslíkové pasti musí obsluha manuálně přepnout klapky a vyměnit kyslíkovou past.



obr. 4-1 Konceptní řešení s manuálním ovládáním ventilu a vizuální kontrolou

4.2 Koncept 2

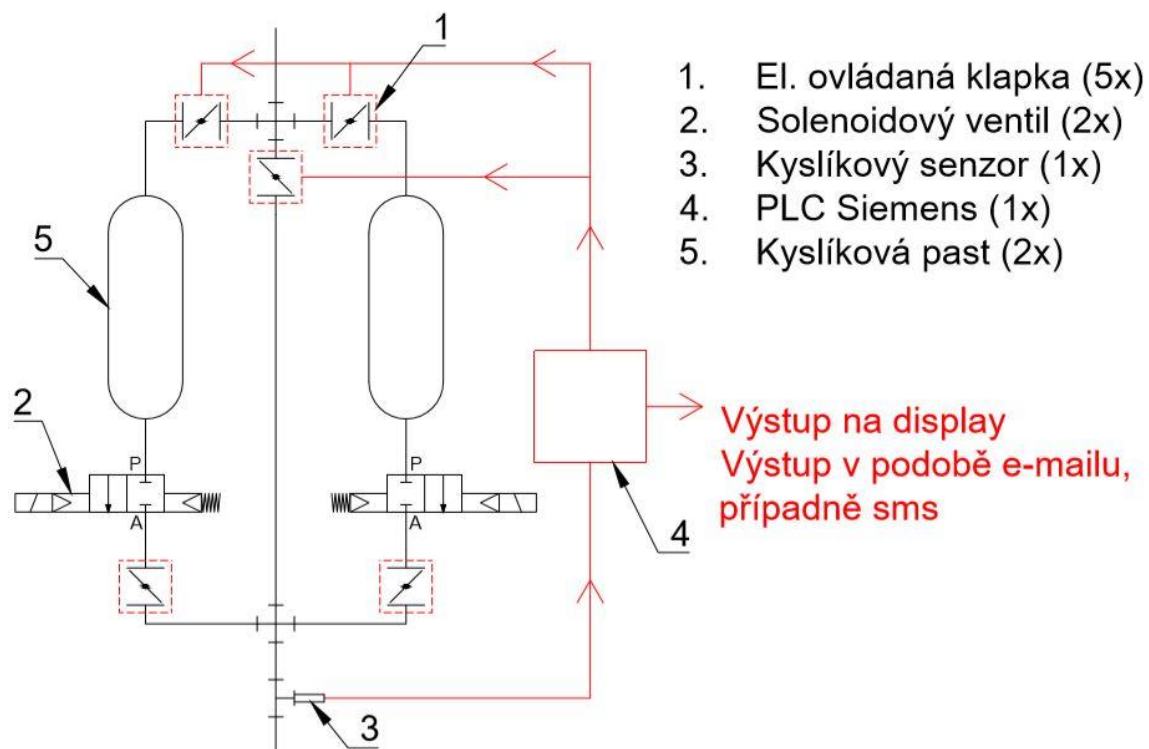
Přepínání mezi jednotlivými větvemi je řešeno klapkami s manuálním ovládáním. V tomto konceptu větve obsahují kyslíkovou past, která zajišťuje kapacitu pro samotné čištění. Vyčerpání kyslíkové pasti je kontrolováno pomocí kyslíkového senzoru umístěného na výstupu z kyslíkového filtru. Když dojde k vyčerpání, kyslíkový senzor zaznamená tuto změnu. Tato informace je předána obsluze ve formě textové zprávy, e-mailu nebo výpisem na display. Obsluha pak musí ručně přepnout klapky a zajistit výměnu vyčerpané kyslíkové pasti.



obr. 4-2 Konceptní řešení s manuálním ovládáním ventilu a kyslíkovým čidlem

4.3 Koncept 3

Přepínání mezi jednotlivými větvemi je zajištěno elektricky ovládanými klapkami. V tomto konceptu opět větve obsahují kyslíkovou past. Na výstupu je opět umístěn kyslíkový senzor. Na základě dat získaných z kyslíkového senzoru PLC řídí elektricky ovládané klapky. Obsluha pak nemusí řešit přepínání klapek, ale musí zajistit výměnu vyčerpané kyslíkové pasti.



obr. 4-3 Konceptní řešení s automatickým ovládáním ventilu a kyslíkovým čidlem

4.4 Analýza rizik

V první řadě je nutné sjednotit pohled na pravděpodobnost a význam výskytu rizika. Zvolil jsem škálu pro hodnocení v 5 úrovních dle následujících tabulek (tab. 4-1, tab. 4-2).

tab. 4-1 Pravděpodobnost výskytu rizika [30]

Riziko – Pravděpodobnost výskytu		
Úroveň	Označení	Interval pravděpodobnosti
5	téměř jisté	vyskytne se skoro vždy
4	pravděpodobné	pravděpodobně se vyskytne
3	možné	někdy se může vyskytnout
2	nepravděpodobné	vyskytnout se může, ale nemusí se vyskytnout vůbec
1	téměř vyloučené	vyskytuje se pouze ve výjimečných případech

Tabulka (tab. 4-1) určuje, s jakou pravděpodobností dané riziko nastane. Úroveň 5 odpovídá nejvyšší pravděpodobnosti výskytu rizika a úroveň 1 nejnižší pravděpodobnost výskytu rizika.

tab. 4-2 Významnost vlivu a dopad rizika [30]

Riziko – Významnost vlivu/dopad rizika		
Úroveň	Označení dopadu	Interval pravděpodobnosti
5	katastrofický	významně ovlivňuje fungování
4	velmi významný	Významně ovlivňuje dílčí aktivity
3	významný	vyžaduje okamžité řešení situace
2	drobný	ovlivňuje pouze dílčí aktivity
1	téměř neznatelný	neovlivňuje znatelně fungování

Tabulka (tab. 4-2) určuje význam a dopad rizika na funkčnost zařízení, finanční ztrátu a na bezpečnost obsluhy zařízení.

4.4.1 Hodnocení rizik konceptu 1

Chyba obsluhy při přepínání ventilů může nastat, pokud obsluha ve špatném pořadí zapne/vypne ručně ovládané ventily. Případně v daném pracovním modu nechá chybně otevřené/zavřené ručně ovládané ventily. Chyba obsluhy při kontrole vyčerpání může nastat, pokud obsluha nebude pravidelně vizuálně kontrolovat indikační kyslíkovou past. Poškození výtisku nastane, pokud dojde ke špatnému postupu při výměně vyčerpané kyslíkové pasti. Vysoké provozní náklady jsou způsobeny nutností výměny indikační kyslíkové pasti a velké kyslíkové pasti. Počáteční náklady jsou nízké z důvodu absence řídicího systému, čidel a motorků. Celá konstrukce je postavena pouze z mechanických součástí.

tab. 4-3 Stanovení rizik konceptu 1, běžné riziko 0-8 (zelená), závažné riziko 9-15 (žlutá), kritické riziko 16-25 (červená)

Rizika konceptu 1			
Identifikované riziko	Pravděpodobnost	Dopad	Úroveň rizika
chyba obsluhy při přepínání ventilů	3	3	9
chyba obsluhy při kontrole vyčerpání	3	2	6
poškození výtisku	2	4	8
vysoké provozní náklady	4	3	12
vysoké počáteční náklady	2	2	4
vysoké tlakové ztráty	4	5	20

Koncept 1 se dle analýzy ukázal jako nevhodný. Ukázalo se, že zde existuje téměř jisté riziko vysokých tlakových ztrát. Ostatní sledované parametry také vykazují vyšší riziko než u zbylých dvou konceptů.

4.4.2 Hodnocení rizik konceptu 2

Chyba obsluhy při přepínání ventilů může nastat stejně jako u konceptu 1. Chybovost obsluhy při kontrole vyčerpání je snížena díky kyslíkovému čidlu. Data z čidla lze zasílat do počítače, případně do mobilu. Díky tomu se obsluha nemusí spoléhat na vizuální kontrolu indikační kyslíkové pasti. Poškození výtisku může nastat stejně jako u konceptu 1. Provozní náklady jsou v tomto konceptu sníženy díky absenci indikační kyslíkové pasti. Při vyčerpání je tedy nutné měnit pouze velkou kyslíkovou past. Tlakové ztráty jsou nižší, protože nemusíme uvažovat ztrátu přes indikační kyslíkovou past.

tab. 4-4 Stanovení rizik konceptu 2, běžné riziko 0-8 (zelená), závažné riziko 9-15 (žlutá), kritické riziko 16-25 (červená)

Rizika konceptu 2			
Identifikované riziko	Pravděpodobnost	Dopad	Úroveň rizika
chyba obsluhy při přepínání ventilů	3	3	9
chyba obsluhy při kontrole vyčerpání	2	2	4
poškození výtisku	2	4	8
vysoké provozní náklady	3	3	9
vysoké počáteční náklady	2	2	4
vysoké tlakové ztráty	2	5	10

Koncept 2 se ukazuje jako vhodnější, dosahuje nižších rizik u všech sledovaných parametrů. Hlavně je zde výrazně nižší riziko vysokých tlakových ztrát. Zároveň tento koncept vykazuje nižší provozní náklady ve srovnání s konceptem 1.

4.4.3 Hodnocení rizik konceptu 3

V tomto konceptu je chybovost obsluhy u všech identifikovaných rizik snížena na minimum, a to díky automatizaci všech pracovních módů. Díky tomu jsou sníženy nároky na obsluhu, která pouze vybírá potřebný pracovní mód. Provozní náklady jsou totožné s konceptem 2. Počáteční náklady jsou vyšší než u předešlých případů, a to díky nutnosti pořízení klapky s elektrickým pohonem a řídicího modulu. Tlakové ztráty jsou totožné s konceptem 2.

tab. 4-5 Stanovení rizik konceptu 3, běžné riziko 0-8 (zelená), závažné riziko 9-15 (žlutá), kritické riziko 16-25 (červená)

Rizika konceptu 3			
Identifikované riziko	Pravděpodobnost	Dopad	Úroveň rizika
chyba obsluhy při přepínání ventilů	1	3	3
chyba obsluhy při kontrole vyčerpání	1	2	2
poškození výtisku	1	4	4
vysoké provozní náklady	3	3	9
vysoké počáteční náklady	4	2	8
vysoké tlakové ztráty	2	5	10

Koncept 3 se ukazuje jako vhodnější než koncept 2. Tento koncept snižuje chybovost obsluhy na minimum. Zároveň zachovává stejné riziko vysokých tlakových ztrát a vykazuje stejné provozní náklady. Nevýhodou oproti konceptu 1 a 2 jsou vyšší počáteční náklady.

S ohledem na výsledky všech třech analýz se jako nejvhodnější řešení ukázal koncept 3, a to zejména díky minimální chybovosti obsluhy. Tento koncept tedy bude dále rozpracován v konstrukčním řešení.

5 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

5.1 Provozní parametry zařízení SLM Solution 280^{HL} v1.0

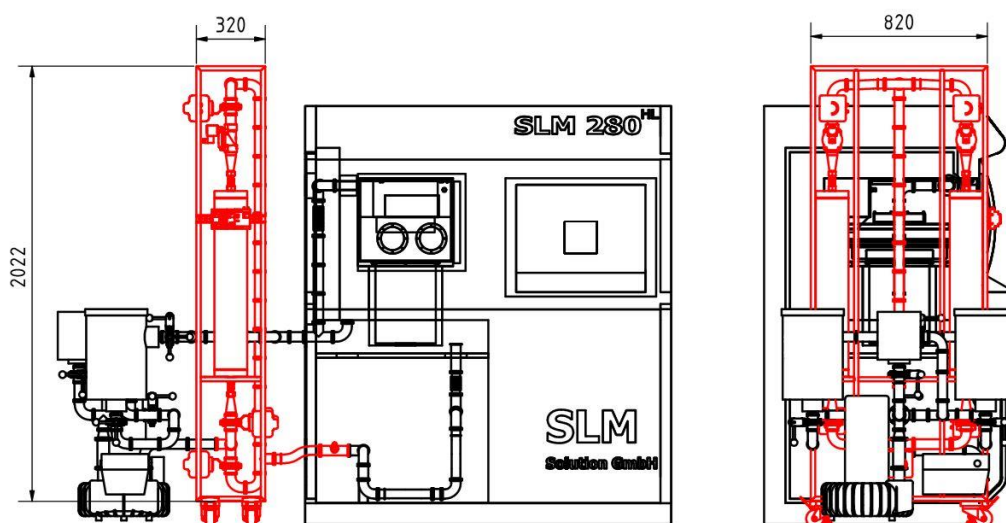
Provozní parametry současného zařízení SLM Solution 280^{HL} v1.0 byly konzultovány s vedoucím bakalářské práce.

tab. 5-1 Tabulka provozních parametrů zařízení SLM Solution 280^{HL} [20]

	Hodnota	Jednotka
průtok inertní atmosféry	52,48	[m ³ /h]
maximální přetlak na vstupu	500	[mbar]
požadovaný přetlak na výstupu	12	[mbar]
provozní teplota inertní atmosféry	20-50	[°C]
čistota inertního plynu z tlakové nádoby	0,001	[%] O ₂
požadovaná čistota inertní atmosféry	0,1	[%] O ₂

5.2 Umístění kyslíkového filtru do stávajícím systému SLM Solution 280^{HL} v1.0

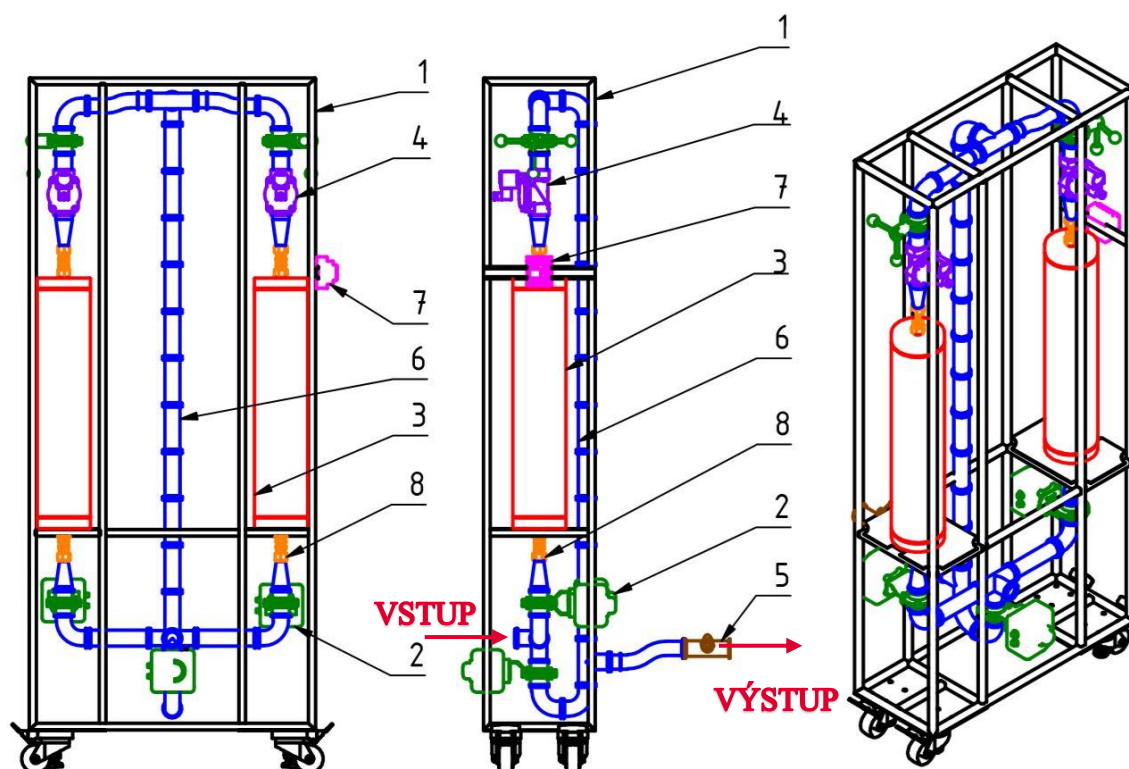
Vzhledem k rozměrům (320x820x1870) mm filtru, ho nebylo možné umístit do prostoru zařízení SLM Solutions 280^{HL} v1.0 (2.1.4). Jako nejvhodnější se ukázal prostor z levé strany zařízení SLM 280^{HL} v1.0, který vznikne odsunutím filtru spalin (2.1.4)



obr. 5-1 Schéma umístění kyslíkového filtru do stávajícího systému SLM Solution 280^{HL} v1.0

5.3 Konstrukční řešení kyslíkového filtru

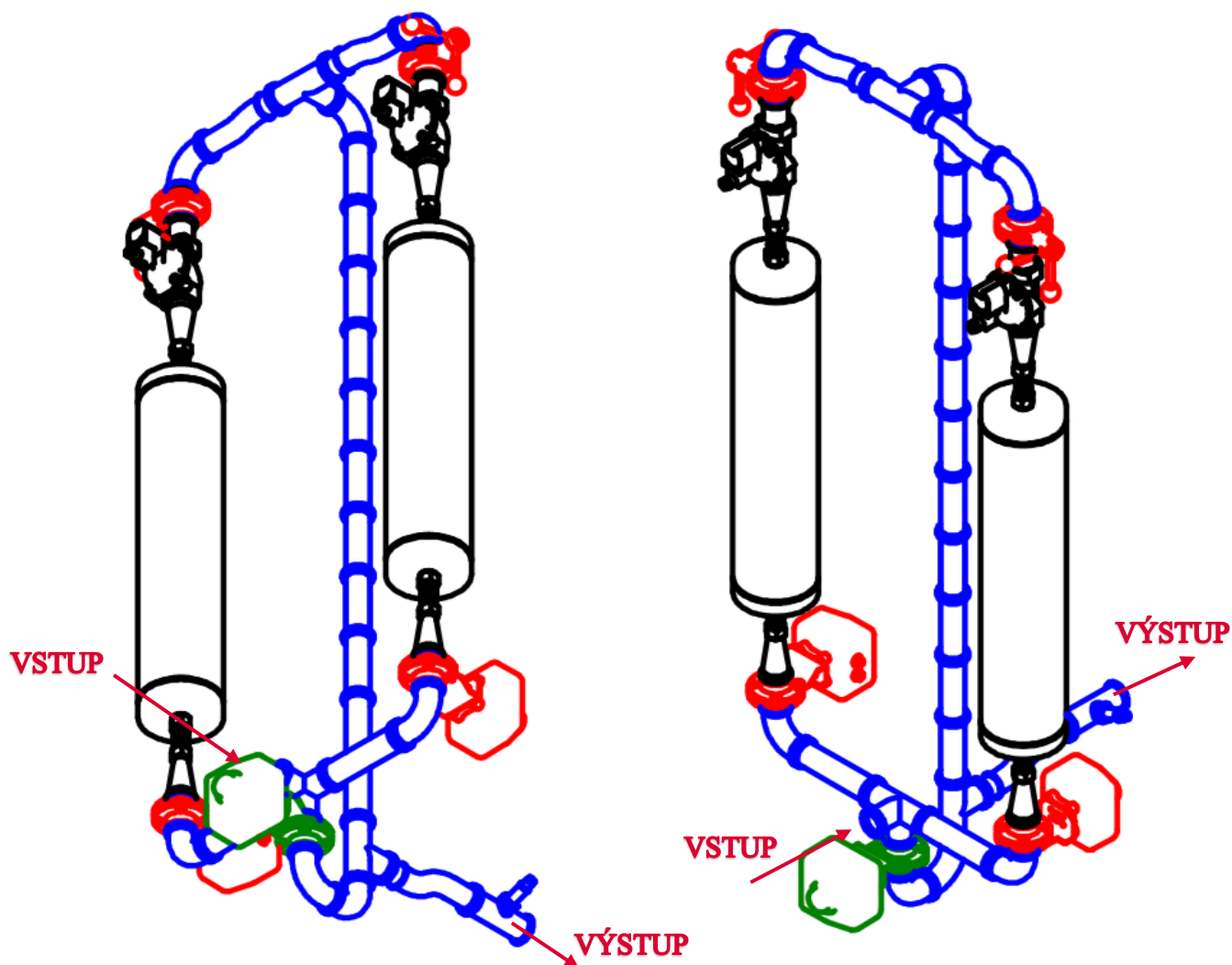
Kyslíkový filtr bude pracovat ve třech režimech: napouštění inertní atmosféry (5.3.1), filtrace zbytkového kyslíku (5.3.2) a výměna vyčerpané oxygen trap (5.3.3). Vstup do filtru je umístěn ve spodní části, tak aby byla zajištěna plynulá návaznost na filtr spalín. Na výstupu je umístěno flexibilní potrubí, které má za úkol vyrovnat výškový rozdíl potrubí mezi kyslíkovým filtrem a zařízením SLM Solutions 280^{HL} v1.0. Pro ušetření místa je kyslíkový senzor umístěn do pracovního prostoru SLM Solutions 280^{HL} v1.0. Rám má za úkol nést váhu kyslíkové pasti (přibližně 30 kg/kus), tak aby nedošlo k deformaci potrubí. Rám je umístěn na čtyřech kolečkách pro průmyslové aplikace, které zajišťují snadnou manipulaci se zařízením. Kolečka disponují integrovanou strojní patkou, která slouží ke snadné a rychlé aretaci zařízení.



obr. 5-2 Konstrukce kyslíkového filtru (1 - černá) rám, (2 - zelená) ovládané ventily, (3 - červená) kyslíkové pasti, (4 - fialová) přímo ovládaný solenoidový ventil, (5 - hnědá) senzor kyslíku, (6 - modrá) prvky potrubí, (7 - růžová) řídicí jednotka Logo Soft, (8 - oranžová) rychlospojky

5.3.1 Napouštění inertní atmosféry

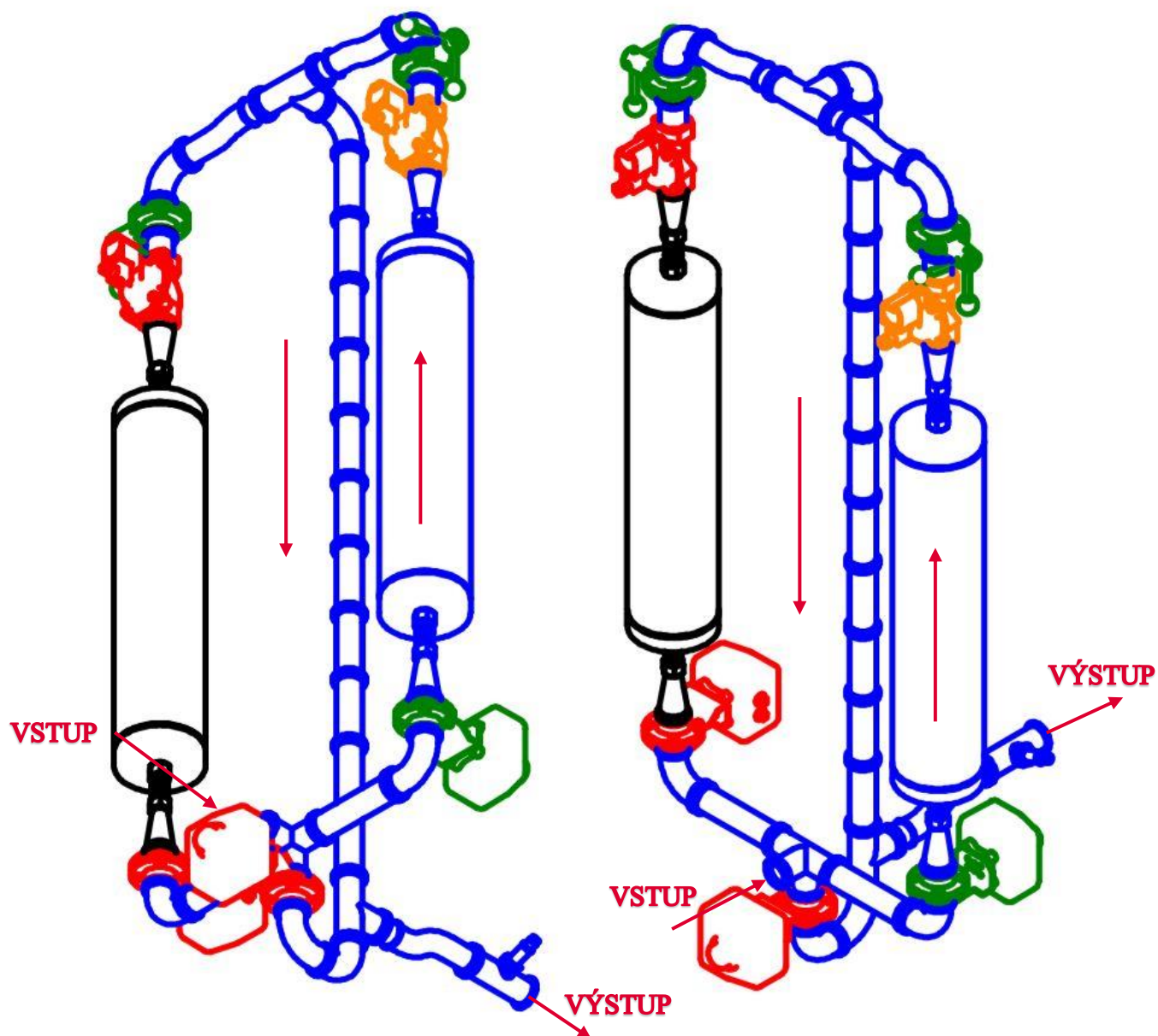
Napouštění inertní atmosféry do stroje probíhá před zahájením výroby dílu. Okruh je naplněn okolní atmosférou, kterou postupně vytlačuje inertní plyn. Proto je nutné kyslíkové pasti uchránit před atmosférickým kyslíkem, tak aby nedošlo k jejich zbytečnému vyčerpání. Pro tyto účely se otevře ovládaný ventil (zelená), ostatní ventily (červená) jsou v tuto chvíli uzavřeny. Tento režim může být použit i pro materiály u kterých nehrozí vznik zbytkového kyslíku během zpracování technologií SLM.



obr. 5-3 Schéma režimu napouštění inertní atmosféry, otevřeno (zelená), uzavřeno (červená), proudící plyn (modrá)

5.3.2 Filtrace zbytkového kyslíku

Filtrace zbytkového kyslíku probíhá během výrobního procesu. Pro zajištění nepřetržité funkce je filtr opatřen dvěma větvemi. Pokud během výroby dojde k vyčerpání kyslíkové pasti, tak dojde k automatickému přepnutí, tak aby směs plynů mohla proudit přes druhou identickou větev. Přepínání jednotlivých ventilů zajišťuje řídicí systém Logo!Soft. Informace o vyčerpání kyslíkových pastí je získána ze senzoru kyslíku umístěného na výstupu z kyslíkové filtru. Tento senzor není určený pro přesné měření koncentrace kyslíku, ale pro zaznamenání nárustu kyslíku v okruhu inertní atmosféry. Tento nárůst pak indikuje vyčerpání kyslíkové pasti.

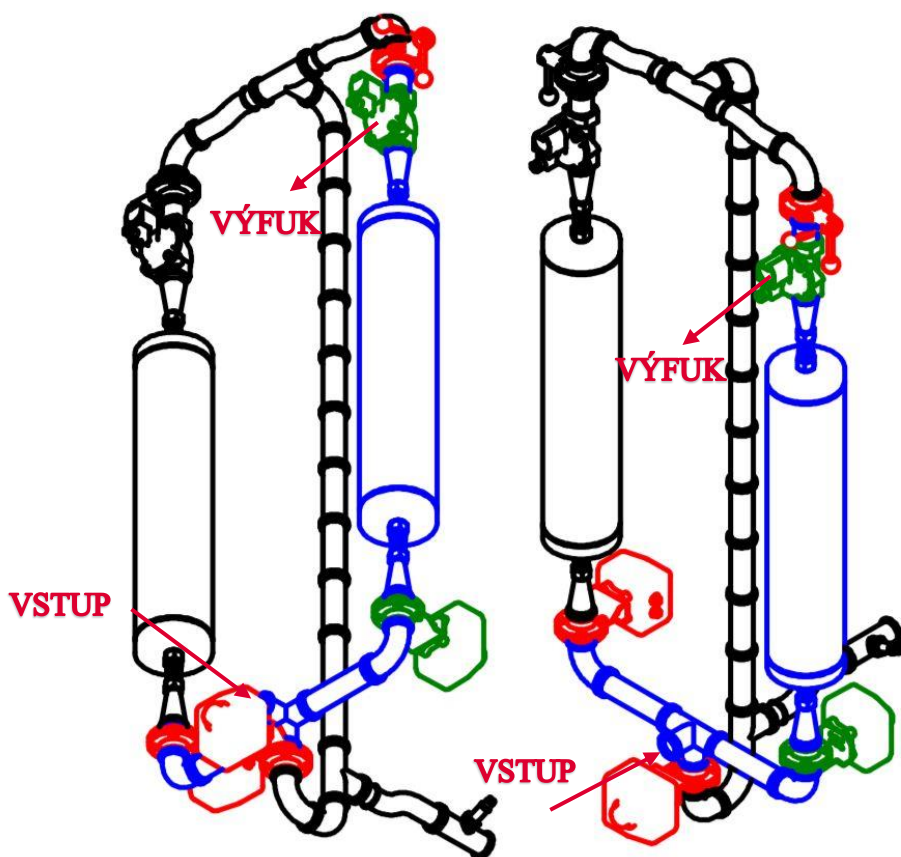


obr. 5-4 Schéma režimu filtrace zbytkového kyslíku, otevřeno (zelená), uzavřeno (červená), proudící plyn (modrá), průtok umožněn a výfuk uzavřen (oranžová)

5.3.3 Výměna vyčerpané kyslíkové pasti

Po vyčerpání kyslíkové pasti je nutné zajistit výměnu, tak aby nedošlo ke kontaminaci okruhu inertní atmosféry. Výměna vyčerpané kyslíkové pasti může probíhat po napuštění inertní atmosféry (5.3.1), anebo paralelně s filtrací zbytkového kyslíku probíhající na druhé větvi. Není tedy nutné přerušit výrobu kvůli výměně vyčerpané kyslíkové pasti.

Snadná výměna je zajištěna rychlospojkami, které jsou umístěny na obou stranách kyslíkové pasti. Oboustranně i jednostranně uzavíratelné rychlospojky mají tlakovou ztrátu řádově stovky mbar. Rychlospojky, které neumožňují uzavření po odpojení, mají tlakovou ztrátu řádově desítky mbar, proto se ukázaly jako vhodnější (5.4.4). Nevýhodou je to, že po odpojení dojde ke kontaminaci prostoru okolní atmosférou mezi uzavřenými ventily. Atmosférický kyslík by mohl v pracovní komoře krátkodobě zvýšit koncentraci kyslíku a zhoršit tak kvalitu tištěného výrobku. Proto je nutné tuto atmosféru před spuštěním větve vypustit. To je zajištěno nejprve uzavřením ventilu (červená) umístěného na výstupu z kyslíkové pasti a následným otevřením přímo ovládaného solenoidového ventilu (5.4.2). Poté je atmosféra vytlačena inertním plynem z okruhu pryč. Krátkodobě je tedy nutné pustit nový argon do okruhu inertní atmosféry.



obr. 5-5 Schéma režimu výměny vyčerpané kyslíkové pasti, výfuk a průtok otevřen (zelená), uzavřeno (červená), proudící plyn (modrá)

5.4 Volba normalizovaných konstrukčních prvků

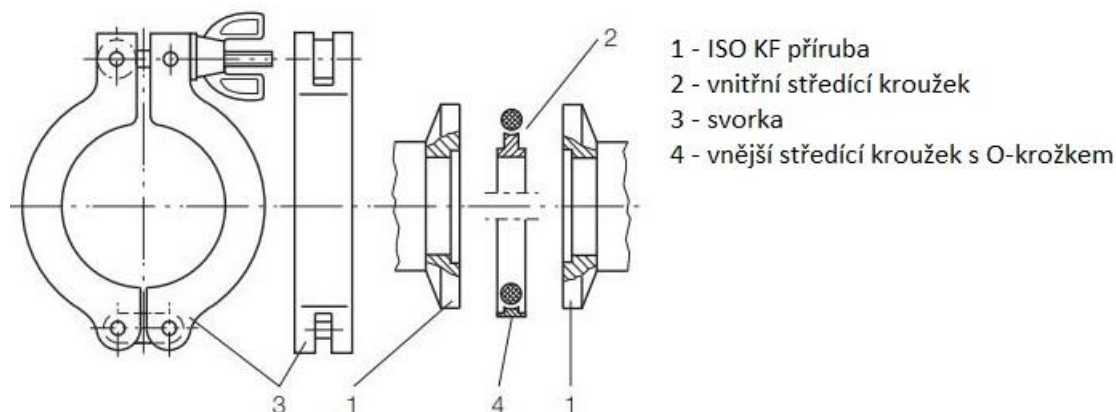
Konstrukční prvky byly voleny s ohledem na informace získané ze studie současného stavu poznání (2), provozní parametry zařízení SLM Solution 280^{HL} v1.0 (5.1) a na nároky vyplývající z cílů práce (3).

5.4.1 Volba potrubních prvků

Stávající systém využívá potrubní prvky DN 40 s vakuovými přírubami ISO KF od společnosti AWH. Pro zajištění kompatibility využijí stejné potrubní prvky od společnosti AWH. V kyslíkovém filtru byly využity tyto prvky: kolena, T-kusy, přímé potrubí. Prvky jsou vyrobeny z oceli DIN 1.4307 s vnitřní drsností povrchu $R_a \leq 0,8 \mu\text{m}$ [31]. Potrubní prvky jsou spojovány pomocí vakuových spojek ISO KF [31] [32].

Vakuová spojka ISO KF

Vakuová spojka ISO KF se skládá z přírub ISO KF, svorky a středícího kroužku s O-kroužkem [32]. Tento spoj umožňuje rychlou montáž a demontáž [32].



obr. 5-6 Schéma vakuové spojky ISO KF [32]

Tlaková ztráta v kolenu

Tlaková ztráta v kolenu je počítána pomocí webového softwaru [33]. Tlakové ztráty jsou počítány pro nejvyšší tlak, který může pumpa do systému dodat, pro nejvyšší teplotu proudícího média a pro nejvyšší objemový průtok v systému. Ve výpočtu zanedbávám stopové množství ostatních plynů, které se v inertní atmosféře mohou objevovat.

Výstup výpočtu

Zacházení s tekutinou:	Argon / plyný
Objemový průtok:	52,48 m ³ / h
Hustota:	1,759 kg / m ³
Dynamická viskozita:	20,96 10 ⁻⁶ kg / ms
Potrubní prvek:	Kruhový loket
Rozměry prvku:	Průměr potrubí D: 40 mm Poloměr R: 50 mm Úhel w ve stupních: 90
Rychlost proudění:	11,6 m / s
Reynoldsovo číslo:	38942
Průtok 2:	-
Reynolds číslo 2:	-
Průtoková forma:	turbulentní
Drsnost potrubí:	0,01 mm
Koeficient tření potrubí:	0,02
Hodnota Zeta:	0,38
Hodnota Zeta minus zkumavka:	-
Druckv. minus potrubí:	-
Tlaková ztráta:	0,45 mbar 0 bar

obr. 5-7 Výstup z webového softwaru tlakových ztrát v kolenu [40]

Tlaková ztráta v T-kusu

Tlaková ztráta v T-kusu je počítána pomocí webového softwaru [33]. Tlakové ztráty jsou počítány pro nejvyšší tlak, který může pumpa do systému dodat, pro nejvyšší teplotu proudícího média a pro nejvyšší objemový průtok v systému. Ve výpočtu zanedbávám stopové množství ostatních plynů, které se v inertní atmosféře mohou objevovat.

Výstup výpočtu

Zacházení s tekutinou:	Argon / plyný
Objemový průtok:	52,48 m ³ / h
Hustota:	1,759 kg / m ³
Dynamická viskozita:	20,96 10 ⁻⁶ kg / ms
Potrubní prvek:	T-kus s ostrými hranami
Rozměry prvku:	Průměr potrubí D1: 40 mm Průměr potrubí D2: 40
Rychlost proudění:	11,6 m / s
Reynoldsovo číslo:	38942
Průtok 2:	5,8 m / s
Reynolds číslo 2:	19471
Průtoková forma:	turbulentní
Drsnost potrubí:	
Koeficient tření potrubí:	
Hodnota Zeta:	1,08
Hodnota Zeta minus zkumavka:	-
Druckv. minus potrubí:	-
Tlaková ztráta:	1,27 mbar 0 bar

obr. 5-8 Výstup z webového softwaru tlakových ztrát v T-kusu [40]

Tlaková ztráta v přímých částech potrubí

Tlaková ztráta v přímých částech potrubí je počítána pomocí webového softwaru [33]. Tlakové ztráty jsou počítány pro nejvyšší tlak, který může pumpa do systému dodat, pro nejvyšší teplotu proudícího média a pro nejvyšší objemový průtok systémem. Ve výpočtu zanedbávám stopové množství ostatních plynů, které se v inertní atmosféře mohou objevovat.

Výstup výpočtu

Zacházení s tekutinou:	Argon / plyný
Objemový průtok:	52,48 m ³ / h
Hustota:	1,759 kg / m ³
Dynamická viskozita:	20,96 10 ⁻⁶ kg / ms
Potrubní prvek:	Kruhová trubka
Rozměry prvku:	Průměr potrubí D: 40 mm Délka potrubí L: 1,8 m
Rychlost proudění:	11,6 m / s
Reynoldsovo číslo:	38942
Průtok 2:	-
Reynolds číslo 2:	-
Průtoková forma:	turbulentní
Drsnost potrubí:	0,01 mm
Koeficient tření potrubí:	0,02
Hodnota Zeta:	1,03
Hodnota Zeta minus zkumavka:	-
Druckv. minus potrubí:	-
Tlaková ztráta:	1,22 mbar 0 bar

obr. 5-9 Výstup z webového softwaru tlakových ztrát v přímých částech potrubí [40]

Celková délka přímých částí potrubí byla spočítána v modelu kyslíkového filtru, za pomoci měřicího nástroje, který je součástí programu Autodesk Inventor Professional 2020. Výsledná hodnota byla zaokrouhlena směrem nahoru na 1 800 mm.

5.4.2 Volba ventilů

Uzavírací mezi-přírubová klapka od společnosti AWH

Konstrukce klapky je přizpůsobena pro použití v aplikacích, které vyžadují čistotu proudícího média [34]. Těsnost je zajištěna dvěma O-kroužky [34]. Materiál těsnění je silikon. Klapka je vyrobena z oceli DIN 1.4307 (304L) s vnitřní drsností povrchu $R_a \leq 0,8 \mu\text{m}$ [34]. Maximální provozní tlak je 10 barů [34]. Stavebnicová konstrukce klapky umožňuje použít ruční ovládání, anebo ovládání elektrickým pohonem. Elektrický pohon typ E1 má reakční čas 7 s a točivý moment 30 Nm [34]. Pohon pracuje při napětí 24 V DC [34]. Ochrana pohonu je zajištěna certifikátem IP67 [34].



obr. 5-10 Uzavírací mezi-přírubová klapka s elektrickým pohonem [34]

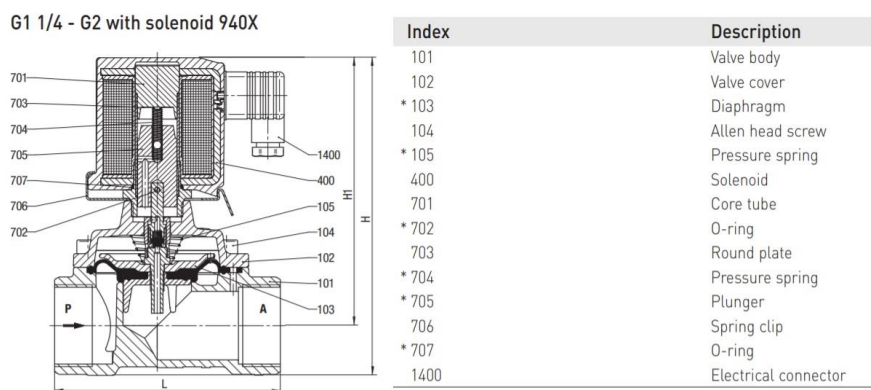
Výrobce udává pro klapku DN 40 jmenovitý průtokový součinitel (K_v) $60 \text{ m}^3/\text{h}$ [34]. Z této hodnoty lze vypočítat tlakové ztráty ventilu. Pro tyto účely byla využita online kalkulačka společnosti Bürker [35].

Argon	▼	Tlakový rozdíl 0,001 bar Tlakový rozdíl 1,111 mbar
Nové médium		
<input type="radio"/> Hodnota K_v <input type="radio"/> Proudění <input checked="" type="radio"/> Pokles tlaku		
Proudění	<input type="text" value="52,48"/>	<input type="radio"/> l/min <input checked="" type="radio"/> m^3/h
Hodnota K_v	<input type="text" value="60"/>	<input checked="" type="radio"/> Vstupní tlak <input type="radio"/> Zpětný tlak
Vstupní tlak	<input type="text" value="0,5"/>	m^3/h
Teplota	<input type="text" value="50"/>	bar (relativní)
		$^{\circ}\text{C}$

obr. 5-11 Výstup z webového softwaru tlakových ztrát klapky [35]

Mosazný přímo ovládaný solenoidový ventil od společnosti NORGREN

Tento ventil je určen pro inertní plyny. Ventil pracuje při tlacích (0-16) bar [36], teplotě proudícího média (-10 až 90) °C [36]. Připojení je řešeno trubkovým závitem G 1 1/2“ [36]. V normální poloze je otevřen, tak aby plyn mohl proudit od bodu P k bodu A. Pomocí šroubu ventilu lze regulovat tlak v systému. Toho je docíleno upuštěním proudícího plynu do okolní atmosféry. Ventil je osazen filtrem, který zajišťuje bezpečnost vypouštění plynu do atmosféry [36].



obr. 5-12 Schéma přímo ovládaného solenoidového ventilu [36]

Výrobce udává pro přímo ovládaný solenoidový ventil G 1 1/2“ jmenovitý průtokový součinitel (Kv) 60 m³/h [34]. Z této hodnoty lze vypočítat tlakové ztráty ventilu. Pro tyto účely byla využita online kalkulačka společnosti Bürker [35].

Argon

Nové médium

Tlakový rozdíl 0,006 bar

Tlakový rozdíl 6,421 mbar

☐ Hodnota Kv

☐ Proudění

☒ Pokles tlaku

Proudění

52,48

☐ l/min

☒ m³/h

Hodnota Kv

25

☒ Vstupní tlak

☐ Zpětný tlak

Vstupní tlak

0,5

m³/h

Teplota

50

bar (relativní)

°C

obr. 5-13 Výstup z webového softwaru tlakových ztrát přímo ovládaného solenoidového ventilu [35]

5.4.3 Volba senzoru kyslíku

Průmyslový senzor kyslíku TecControl

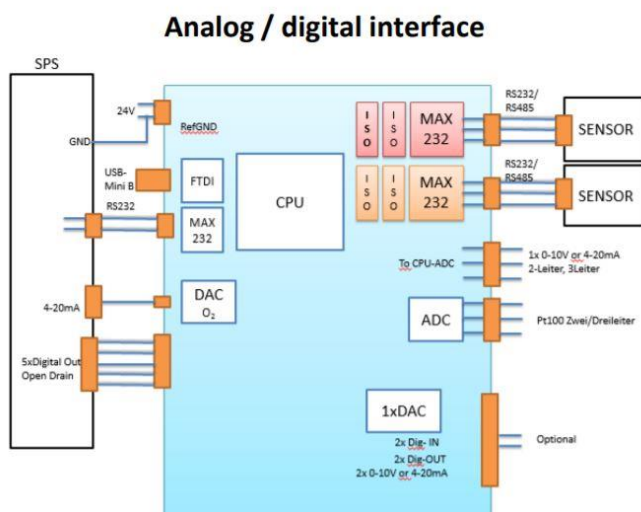
Senzor je určen pro průmyslové aplikace pro měření koncentrace plynného kyslíku. Má reakční dobu (0,5-3) s [37]. Pracuje při tlaku 5 mbar až 20 bar a teplotě (5-130) °C [37]. Napájení je 24 V DC [37]. Připojení je řešeno závitem G 3/4“ [37]. Měřicí rozsah je 0-2000 ppm („parts per million“, 10^6), (0-0,2 %) s přesností 50 ppm (0,005 %) [37]. Čidlo má analogový výstup 4-20 mA [37]. Tyč senzoru se vyrábí v délkách od 30 do 250 mm [37].



obr. 5-14 Kyslíkový senzor TecControl [37]

TecInterface – digitální/analogový převodník

Slouží k převodu digitálního vstupu RS485 na analogový výstupní signál 4-20 mA [38]. Pracuje při napětí 24 V DC [38]. Obsahuje také pět digitálních výstupů pro kontrolu kvality měření a stavu čidla [38].



obr. 5-15 Schéma digitálního/analogového převodníku TecInterface [38]

5.4.4 Volba rychlospojky

Rychlospojka CEJN Série 441

Rychlospojka od společnosti CEJN vyniká vysokým průtokem při nízkých tlakových ztrátách (obr. 5-16). Maximální provozní proud vzduchu je 3 950 l/min při maximálním provozním tlaku 35 bar [39]. Pracuje v teplotní rozsahu (-30 až 100) °C [39]. Takto předimenzované řešení bylo nutné volit s ohledem na snížení tlakových ztrát. Při průtoku 1 000 l/min (60 m³/h) je tlaková ztráta přibližně 0,05 bar (50 mbar) [39]. Provedení volím Samec se závitem G 3/4 “ [39].



obr. 5-16 Graf zobrazující závislost mezi průtokem vzduchu l/min (CFM) na horizontální ose a mezi tlakovou ztrátou bar (PSI) na vertikální ose [39]

5.4.5 Volba kyslíkové pasti

Kyslíkovou past společností Entegris s označením GateKeeper GPU 13M 12R, která je určena pro maximální průtok 2000 slpm (120 m³/h) [28]. Takto předimenzované řešení bylo nutné volit s ohledem na snížení tlakových ztrát. Udávaná čistota argonu na výstupu je ≥ 100 ppt ($1,0 \times 10^{-8}$ %) [28]. Kyslíková past je určena pro čištění inertní atmosféry s čistotou ≥ 10 ppm (0,001 %) [28]. Kyslíková past také odstraňuje vodu (H₂O), oxid uhličitý (CO₂), oxid uhelnatý (CO) a vodík (H₂) [28]. Při průtoku 1 000 l/min (60 m³/h) je tlaková ztráta přibližně 1,5 psig (103,4 mbar) [28].

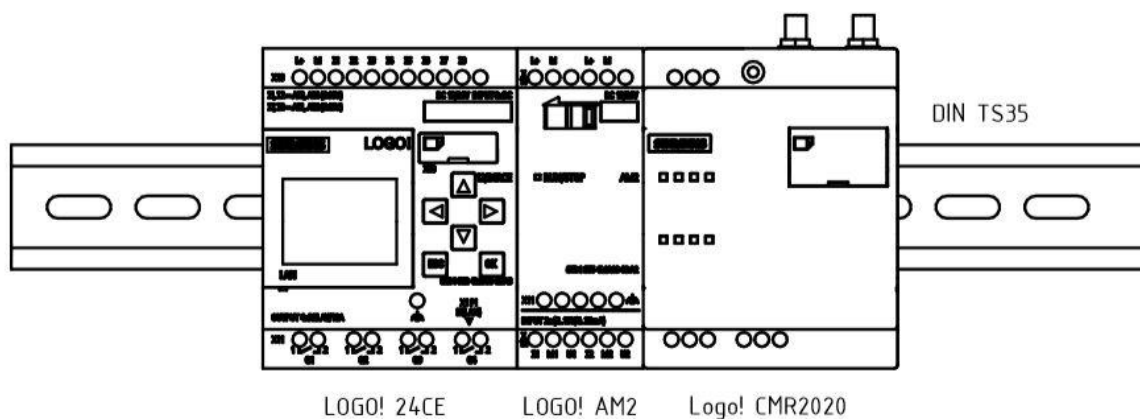
tab. 5-2 Specifikace GateKeeper GPU 13M 12R [28]

Parametr	Hodnota	Jednotka
Provozní teplota	0-65	°C
Velikost kování	G 3/4“	-
Konfigurace kování	Samec-Samec	-
Provozní tlak (absolutní)	1,01-25,5	bar
Maximální průtok	2000 (120)	slpm (m ³ /h)
Rozměry	892xø152,4	mm
Hmotnost	30	kg

5.4.6 Volba řídicího systému

Logické moduly Logo! společnosti Siemens

Logické moduly Logo! jsou určeny pro malé automatizační úlohy. Moduly lze jednoduše instalovat na lištu DIN TS35 [40]. Základní modul s displejem nabízí až 24 digitálních vstupů, 20 digitálních výstupů, 8 analogových vstupů a 8 analogových výstupů [40]. V analogovém režimu pracují při 0-10 V [40]. Používá standardní karty micro CF [40]. Modul také disponuje rozhraním ethernet, které lze použít pro programování [40]. Základní modul lze rozšířit digitálním modulem s 4 vstupy a 4 výstupy, anebo analogovým modulem s 2 vstupy a 2 výstupy, který pracuje při 4-20 mA [40]. Modul lze také rozšířit komunikačními moduly CMR (Communication Module Radio), CMK (KNX) a CSM (Compact Switch Module). Modul CMR umožňuje komunikovat pomocí textových zpráv nebo pomocí e-mailu [40]. Také umožňuje řízení pomocí webového rozhraní [40]. Moduly pracují při napětí 12-24 V DC [40].



obr. 5-17 Uspořádání modulů Logo! v kyslíkovém filtru

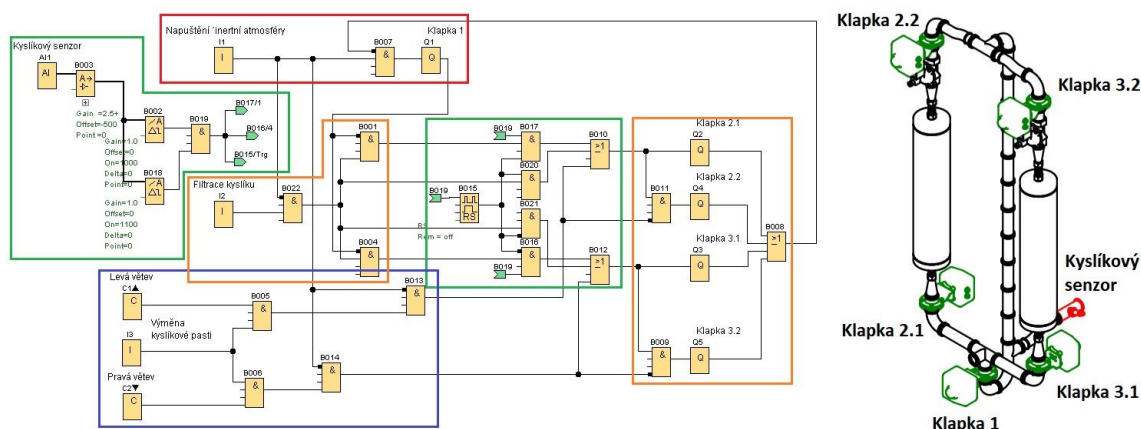
Software Logo!Soft Comfort v8.2 společnosti Siemens

Software Logo!Soft Comfort umožňuje snadnou konfiguraci řídicího programu pro logický modul Logo! [41]. Program je vytvářen pomocí řetězení bloků, které zahrnují rozličné logické funkce. Program umožňuje offline simulaci řídicího programu [41]. Často opakující se konfigurace lze uložit do vlastních bloků [41]. Logo!Soft nabízí přístupový nástroj pro Windows Excel. To umožňuje přenášet data z Loga do Exelu v režimu RUN. Spouští se jako doplněk v softwaru Windows Excel [41]. Dále Logo!Soft nabízí propojení s webem pomocí webového editoru (LWE) [41]. To umožňuje řízení a sledování Loga! pomocí webové stránky. Umožňuje kreslit grafiku, integrovat texty, obrázky, odkazy a řídicí tlačítka. Data lze zobrazovat jako ikony, čísla, grafy nebo posuvníky. Ovládání přes web lze řešit s jakýmkoli koncovým zařízením (např. PC, mobilní telefon, tablet a další) [41].

5.5 Návrh řídicího programu v Logo!Soft Comfort v8.2

Návrh řídicího programu byl vytvořen v programu Logo!Soft Comfort v8.2 Demo od společnosti Siemens.

Primárním úkolem řídicího softwaru je otevírat/uzavírat elektricky ovládané klapky v závislosti na volbě pracovního módu. Program lze rozdělit do čtyřech hlavních sekcí, které jsou ve schématu barevně odlišeny (obr. 5-18) a jejich funkce je popsána v dalších částech.

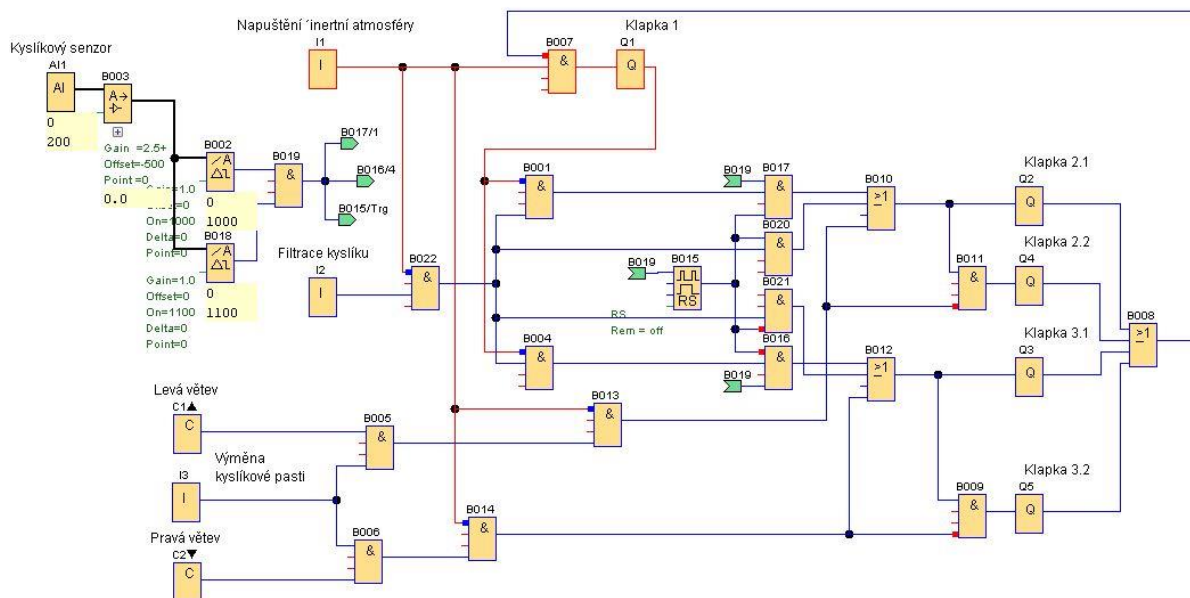


obr. 5-18 Schéma řídicího programu vytvořeného v Logo!Soft Comfort v8.2 Demo, mód napouštění inertní atmosféry (červená), mód filtrace zbytkového kyslíku (oranžová), mód výměny vyčerpané kyslíkové pasti (modrá), zpracování analogového vstupu od senzoru kyslíku (z

Program je navržen tak, aby splňoval všechny požadavky na řízení kyslíkového filtru. V programu jsou ošetřeny i různé kolizní vstupy, které by mohly znemožnit správnou funkci filtru a tím i poškodit tištěný díl. Program by bylo vhodné dále optimalizovat. Přidat časovače dle reálných zkoušek, tak aby nedošlo k poškození mechanických součástí zařízení, případně aby došlo k úplnému provedení příkazu (např. k úplnému otevření/uzavření klapky). Dále lze do programu implementovat funkce, které usnadní obsluhu zařízení. To mohou být hlášky, které se obsluze zobrazí na display před/při/po dané akci. Zároveň lze program vylepšit propojením s webovým rozhraním, kde by obsluha mohla dostávat úhledně všechna známá data o zařízení. Tímto způsobem by bylo možné i vzdáleně řídit celý kyslíkový filtr.

5.5.1 Mód napouštění inertní atmosféry

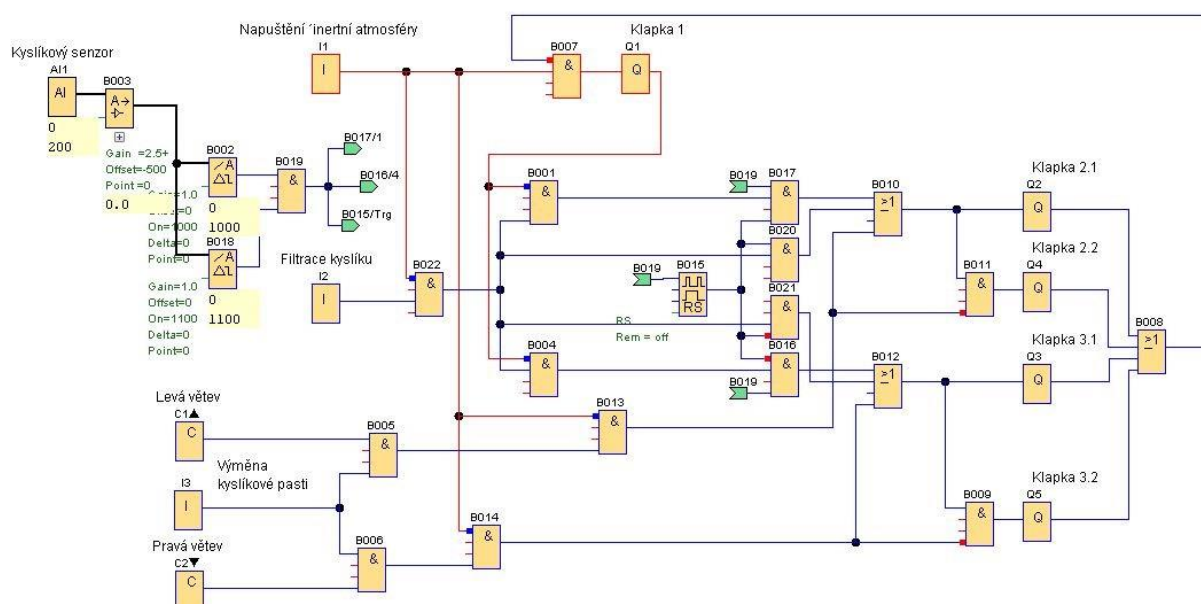
Při sepnutí digitálního vstupu: Napouštění inertní atmosféry, dojde k otevření klapky 1, tím je umožněno plynu proudit mimo kyslíkové pasti a nedojde k jejich vyčerpání vlivem atmosféry bohaté na kyslík (5.3.1). V programu je také ošetřena varianta, že by došlo k aktivaci ostatních módů. V takovém případě program nedovolí jejich spuštění. Zároveň v tuto chvíli program nereaguje na analogový vstup z kyslíkového senzoru.



obr. 5-19 Schéma sepnutého módu napouštění inertní atmosféry,
Booleovská 1 (červená), Booleovská 0 (modrá)

5.5.2 Múd filtrace zbytkového kyslíku

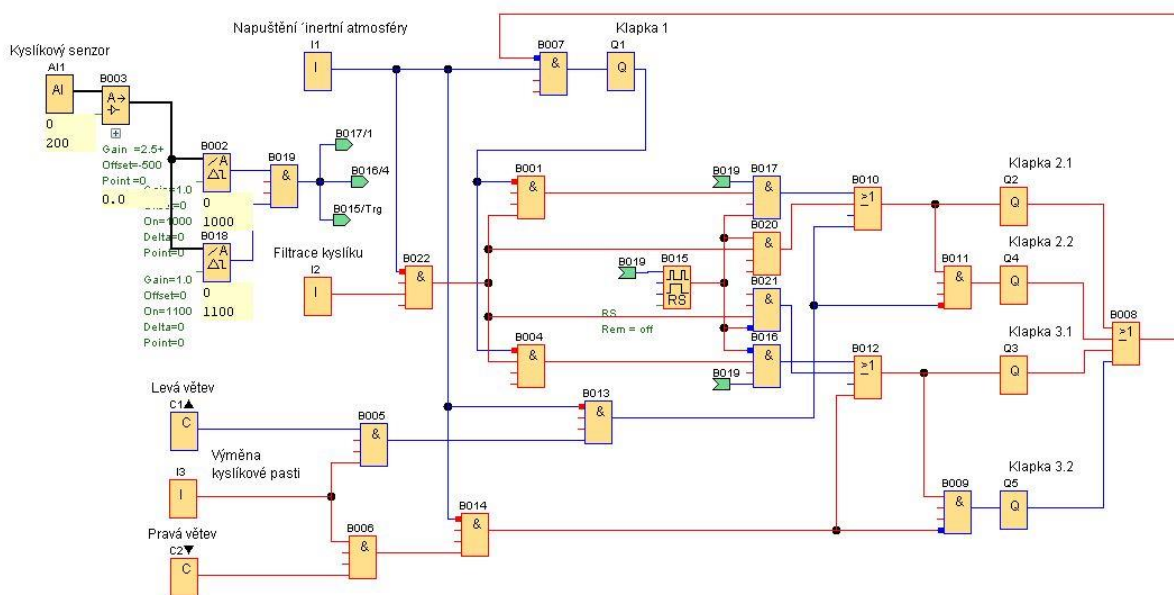
Při sepnutí digitálního vstupu: Filtrace kyslíku, dojde k otevření klapek 2.1/2.2, případně klapek 3.1/3.2 v závislosti na předešlém stavu, který je uložen v paměti. Ve schématu je paměť zobrazena v zeleném poli. Pro další pochopení funkce budeme uvažovat variantu, že v paměti byla uložena konfigurace ventilů 2.1/2.2. Po sepnutí dojde tedy k jejich otevření. Při nárůstu koncentrace kyslíku nad stanovenou mez dojde k uzavření ventilů 2.1/2.2, poté k otevření ventilů 3.1/3.2. Tím je docíleno toho, že filtrace zbytkového kyslíku pokračuje i v případě, že dojde k vyčerpání kyslíkové pasti. Toto vyčerpání signalizuje již zmíněný nárůst koncentrace kyslíku. Obvod je ošetřen proti aktivaci módu „napouštění inertní atmosféry“. Múd výměny vyčerpané kyslíkové pasti může běžet paralelně (5.5.3). Analogový vstup z kyslíkového senzoru je ošetřen proti oscilaci kolem stanovené hodnoty. Ve schématu je to zobrazeno v oranžovém poli.



obr. 5-20 Schéma sepnutého módu napouštění inertní atmosféry,
Booleovská 1 (červená), Booleovská 0 (modrá)

5.5.3 M3d v3m3ny vy3erpan3 kyslíkové pasti

Při sepnutí digitálního vstupu: Vým3na kyslíkové pasti, musí obsluha pomocí šipek na základním modulu Logo! vybrat, zda chce m3nit kyslíkovou past v lev3 v3tvi (v3tev 2), anebo v prav3 v3tvi (v3tev 3). Pro další pochopení funkce budeme uvaŹovat variantu, Źe je sepnutý m3d filtrace zbytkov3ho kyslíku a pracuje v3tev 2, jsou tedy otevřeny ventily 2.1/2.2. Obsluha chce vym3nit vy3erpanou kyslíkovou past ve v3tvi 3. Spustí pŹívod nov3ho inertního plynu z tlakov3 lahve, nastaví si „výfuk“ pŹím3 ovládan3ho solenoidov3ho ventilu ve v3tvi 3. Stiskne šipku na modulu Logo ukazující dolů (↓). Ventily 2.1/2.2 zůstanou otevřeny, nedojde tedy k pŹerušení filtrace. Ventil 3.1 se otevře, ventil 3.2 zůstane zavřený. Inertní plyn proudí skrz v3tev 2 a 3áste3n3 uniká do okolní atmosféry, sebou zároveň unáší atmosféru, která se do v3tve dostala po v3m3n3 kyslíkové pasti. Po pár desítkách sekund může obsluha znovu stisknout šipku na modulu Logo ukazující dolů (↓). Dojde tedy k uzavř3ní ventilu 3.1. Tímto krokem je v3m3na vy3erpan3 kyslíkové pasti hotová. M3d v3m3ny vy3erpan3 pasti může také probíhat po napuštění inertní atmosféry do stroje, tedy pŹes spuštění m3du filtrace zbytkov3ho kyslíku. Vým3na vy3erpan3 kyslíkové pasti by měla prob3hnout co nejdŹíve po jejím vy3erpání. Proto program neuvaŹuje s variantou, Źe bude spuštěný m3d v3m3ny vy3erpan3 kyslíkové pasti a v tu chvíli dojde ke změně koncentrace kyslíku.

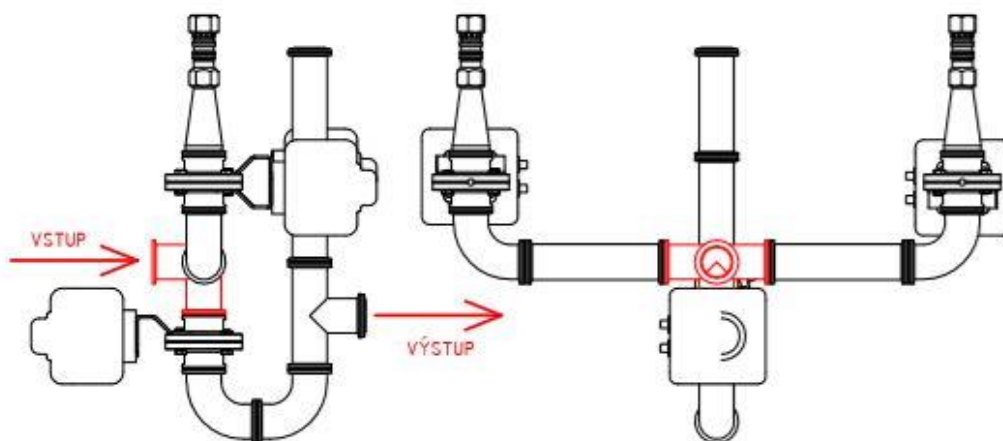


obr. 5-21 Sch3ma sepnut3ho modu v3m3ny vy3erpan3 kyslíkové pasti,
Booleovská 1 (3erv3ná), Booleovská 0 (modrá)

5.6 Nenormalizované konstrukční prvky

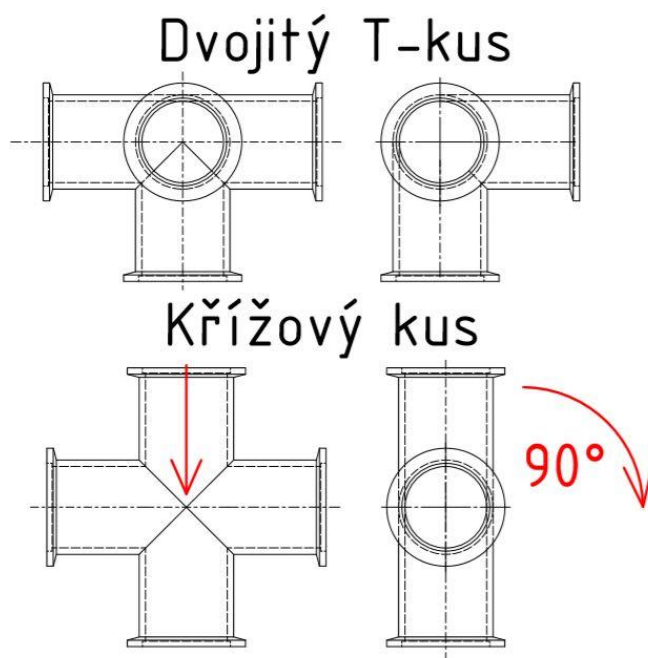
5.6.1 Dvojitý T-kus

Dvojitý T-kus je umístěn na vstupu do filtru kyslíku (obr. 5-22). Dvojitý T-kus by mohl být nahrazen normalizovaným křížovým kusem, který by neměl vliv na funkčnost filtru. Důvodem pro použití dvojitého T-kusu je zmenšení zástavbového prostoru kyslíkového filtru.



obr. 5-22 Umístění Dvojitého T-kusu v sestavě kyslíkového filtru (červená)

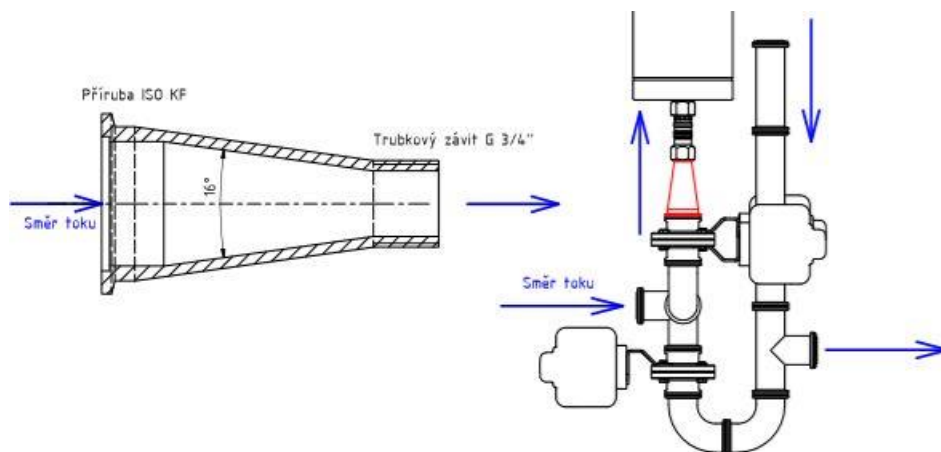
Dvojitý T-kus vychází z normalizovaného křížového kusu. Křížový kus byl upraven, tak že jednu z větví rotujeme o 90° kolem horizontální osy (obr. 5-23).



obr. 5-23 Úprava normalizovaného křížového kusu do dvojitého T-kusu

5.6.2 Konfuzor

Konfuzor v kyslíkovém filtru umožňuje propojení kyslíkové pasti, která disponuje trubkovým závitem G 3/4" (5.4.5) s normalizovanými potrubními prvky DN 40, které disponují přírubami ISO KF (5.4.1). Trubkovému závitu G 3/4" odpovídá potrubí DN 20.



obr. 5-24 Konstrukce a umístění konfuzoru v sestavě kyslíkové filtru (červená)

Tlaková ztráta konfuzoru

Tlaková ztráta v konfuzoru je počítána pomocí webového softwaru [33]. Tlakové ztráty jsou počítány pro nejvyšší tlak, který může pumpa do systému dodat, pro nejvyšší teplotu proudícího média a pro nejvyšší objemový průtok systémem. Ve výpočtu zanedbávám stopové množství ostatních plynů, které se v inertní atmosféře mohou objevovat.

Výstup výpočtu

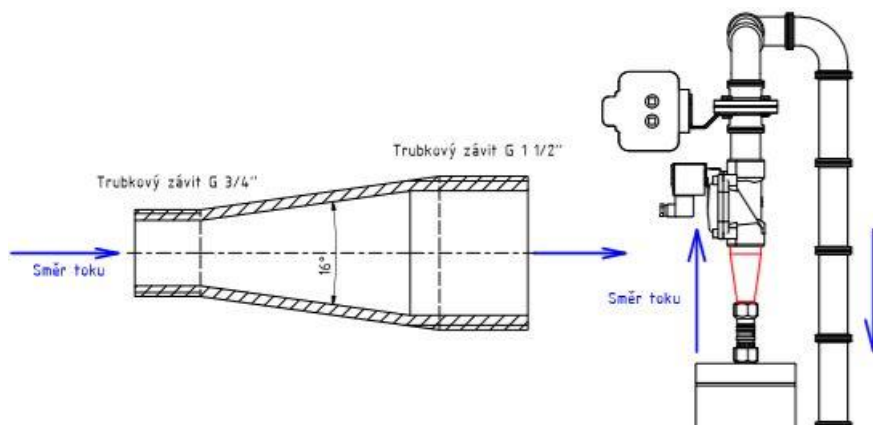
Průtokové médium:	Argon / plyný
Objemový tok :	52,48 m ³ / h
Hustota hmotnosti:	1 759 kg / m ³
Dynamická viskozita:	20,96 10 ⁻⁶ Pa s
Prvek potrubí:	Postupná kontrakce
Rozměry prvku:	Průměr trubky D1: 40 mm Průměr trubky D2: 20 mm Úhel w ve stupni: 8
Rychlost proudění:	11,6 m / s
Reynoldsovo číslo:	38942
Rychlost toku 2:	46,4 m / s
Reynolds číslo 2:	77884
Tok:	turbulentní
Absolutní drsnost:	0,01 mm
Třecí číslo potrubí:	0,02
Koeficient odporu:	0,04
Resist.coeff.branching pipe:-	-
Press.drop branch.pipe:	-
Tlaková ztráta:	0,77 mbar 0 bar

obr. 5-25 Výstup z webového softwaru tlakových ztrát v konfuzoru [33]

Výpočet byl proveden v několika interakcích tak, aby bylo docíleno co nejnižších tlakových ztrát. Jako nejvhodnější se ukázal rozevírací úhel 16 °, ve výpočtu vystupuje polovina tohoto úhlu.

5.6.3 Difuzor

Difuzor v kyslíkovém filtru umožňuje propojení kyslíkové pasti, která disponuje trubkovým závitem G 3/4" (5.4.5) s přímo ovládaným solenoidovým ventilem, který disponuje trubkovým závitem G 1 1/2" (5.4.2). Trubkový závit G 1 1/2" odpovídá potrubí DN 40.



obr. 5-26 Konstrukce a umístění difuzoru v sestavě kyslíkové filtru (červená)

Tlakové ztráty difuzoru

Tlaková ztráta v konfuzoru je počítána pomocí webového softwaru [33]. Tlakové ztráty jsou počítány pro nejvyšší tlak, který může pumpa do systému dodat, pro nejvyšší teplotu proudícího média a pro nejvyšší objemový průtok systémem. Ve výpočtu zanedbávám stopové množství ostatních plynů, které se v inertní atmosféře mohou objevovat.

Výstup výpočtu

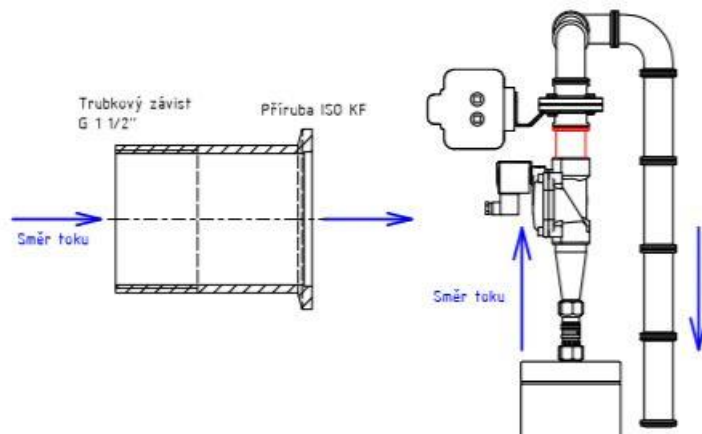
Průtokové médium:	Argon / plyný
Objemový tok ::	52,48 m ³ / h
Hustota hmotnosti:	1 759 kg / m ³
Dynamická viskozita:	20,96 10 ⁻⁶ Pa s
Prvek potrubí:	Postupné rozšiřování
Rozměry prvku:	Průměr trubky D1: 20 mm Průměr potrubí D2: 40 Úhel w ve stupni: 8
Rychlost proudění:	46,4 m / s
Reynoldsovo číslo:	77884
Rychlost toku 2:	11,6 m / s
Reynolds číslo 2:	38942
Tok:	turbulentní
Absolutní drsnost:	0,01 mm
Třecí číslo potrubí:	0,02
Koeficient odporu:	0,17
Resist.coeff.branching pipe:	-
Press.drop branch.pipe:	-
Tlaková ztráta:	3,22 mbar 0 bar

obr. 5-27 Výstup z webového softwaru tlakových ztrát v difuzoru [33]

Výpočet byl proveden v několika interakcích tak, aby bylo docíleno co nejnižších tlakových ztrát. Jako nejvhodnější se ukázal rozevírací úhel 16 °, ve výpočtu vystupuje polovina tohoto úhlu.

5.6.4 Přechodka

Přechodka v kyslíkovém filtru slouží k propojení přímo ovládaného solenoidového ventilu, který disponuje trubkovým závitem G 1 1/2“ (5.4.2) s normalizovanými potrubními prvky DN 40, které disponují přírubami ISO KF (5.4.1).



obr. 5-28 Konstrukce a umístění přechodky v sestavě kyslíkové filtru (červená)

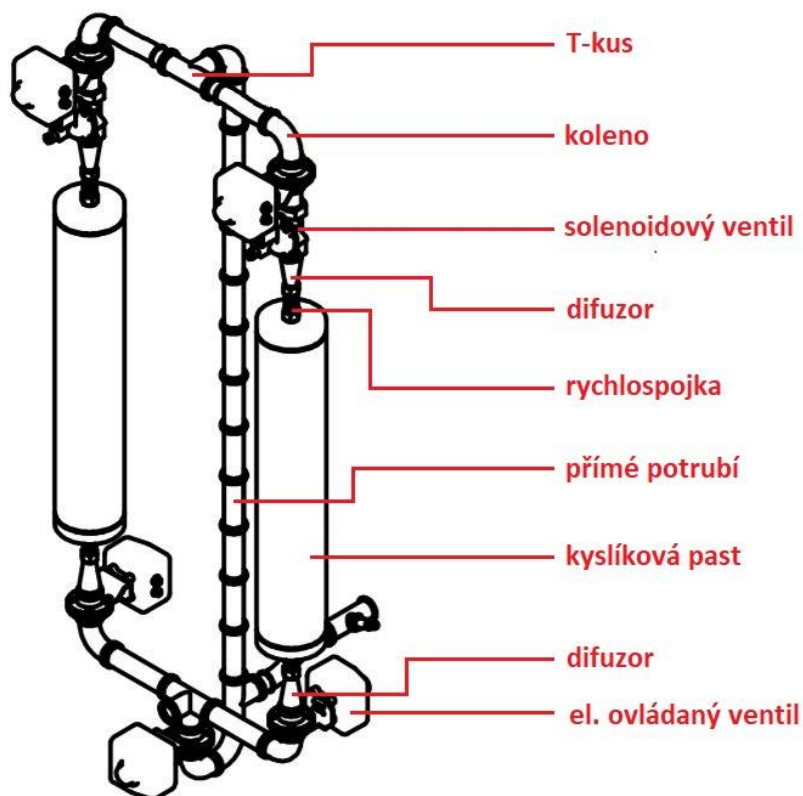
5.7 Kontrola celkových tlakových ztrát

Z analýzy rizik (4.4.3) vyplynulo, že nejvyššího potenciálního rizika dosahují tlakové ztráty. Bylo tedy nutné provést kontrolu. Kontrola byla provedena pro mód filtrace zbytkového kyslíku. Tento mód může dosáhnout nejvyšších tlakových ztrát, protože proudící plyn musí překonat nejvyšší vzdálenost, zároveň musí překonat nejvyšší počet dalších prvků systému (př. ventily, rychlospojky, kyslíková past a další). Celý kontrolní výpočet byl proveden pro nejhorší provozní podmínky jako maximální provozní tlak, maximální průtok, maximální provozní teplota a další (5.1).

tab. 5-3 Tabulka celkových tlakových ztrát módu filtrace zbytkového kyslíku

prvek	počet prvků	tlaková ztráta [mbar]
konfuzor	1	0,77
difuzor	1	3,22
T-kus	2	1,54
koleno	3	1,35
přímé části potrubí	-	1,22
rychlospojka	2	100,00
kyslíková past	1	103,40
el. ovládaná klapka	2	2,22
solenoidový ventil	1	6,42
celková tlaková ztráta	-	220,14

Celkové tlakové ztráty módu filtrace zbytkového kyslíku se ukázaly jako dostatečně nízké, protože maximální vstupní tlak je 500 mbar a požadovaný tlak na výstupu je 12 mbar (5.1).



obr. 5-29 Schéma umístění prvků vystupujících ve výpočtu tlakových ztrát

6 DISKUZE

Navržené zařízení umožňuje práci ve dvou hlavních módech v závislosti na zpracovávaném materiálu. U materiálu, kde pozorujeme nárůst koncentrace kyslíku během zpracování, zapínáme pracovní mód filtrace zbytkového kyslíku. U materiálu, kde nárůst koncentrace kyslíku nepozorujeme, zapínáme pracovní mód napouštění inertní atmosféry. Tento mód pak umožňuje „vyřadit“ okruh kyslíkového filtru z okruhu inertní atmosféry. Dle názvu módu je patrné, že se tento mód používá i pro napouštění inertní atmosféry do systému. Celé zařízení je umístěno v rámu na kolečkách se strojní patkou, která zajišťují jeho snadnou manipulaci a aretaci na místě. Zařízení je primárně určeno pro stroj SLM Solutions 280^{HL} v1.0, ale díky jeho konstrukci lze použít i u dalších SLM strojů společnosti SLM Solutions.

Zařízení umožňuje filtrovat až 120 m³/h plynu s výstupní čistotou ≥ 100 ppt ($1,0 \times 10^{-8}$ %). To je o několik řádů lepší výsledek, než požadovaná hodnota 0,1 %, čímž by měl být odstraněn problém popsáný v literatuře [12] [22] [25] (naházet citace o generování kyslíku během SLM procesu). Pokud by došlo k navýšení průtoku inertní atmosféry, lze zařízení upravit tak, aby umožňovalo filtrovat až 150 m³/h. Zařízení je určeno pro čištění inertní atmosféry s čistotou ≥ 10 ppm (0,001 %). Při vyšší kontaminaci inertní atmosféry nelze zaručit výstupní čistotu ≥ 100 ppt. Samotnou filtraci kyslíku zajišťuje dvojice kyslíkových pastí, které se musí po vyčerpání vyměnit. Filtr je osazen řídicí jednotkou Logo!, která se stará o řízení ventilů, tak aby celé zařízení bylo co nejméně náročné na obsluhu. Jediný mód, který není zcela automatizovaný je výměna vyčerpané kyslíkové pasti. V dalším vývoji zařízení by bylo vhodné i tento mód zcela automatizovat.

Pro řídicí jednotku Logo! Byl navržen řídicí program. Řídicí program umožňuje spuštění všech módů a je ošetřen proti sepnutí více módů najednou a proti oscilaci analogového výstupu ze senzoru kyslíku. Program by bylo vhodné dále optimalizovat, například přidáním časovače dle reálných zkoušek, tak aby nedošlo k poškození mechanických součástí zařízení. Dále by bylo vhodné do programu implementovat funkce, které usnadní obsluhu zařízení. Těmito funkcemi mohou být hlášky vypisované na display, zasílání textových zpráv (e-mailů) obsluze, anebo propojení s webovým rozhraním, které umožňuje dálkové řízení zařízení.

V práci byl proveden výpočet tlakových ztrát, který počítal s nejhoršími možnými pracovními podmínkami zařízení a s 100 % čistotou inertní atmosféry. Tento výpočet byl proveden pomocí online softwaru [35] [33] a pomocí dat získaných od výrobců hydraulických prvků. Proto je nutné tento výpočet považovat za přibližný. Tímto výpočtem se ukázalo, že tlakové ztráty jsou přibližně 220 mbar (relativně). Pumpa, která je součástí filtru spalín dosahuje maximálního tlaku 500 mbar (relativně). Proto lze předpokládat, že tlakové ztráty kyslíkového filtru jsou dostatečně nízké.

Toto zařízení může mít výrazný vliv na zlepšení kvality tištěných dílů. Zároveň může přispět ke snížení tvorby výparu hořčíku, které způsobují rozostření laseru. To ulehčí řízení procesních parametrů zařízení SLM Solutions 280^{HL} v1.0.

V další navazující práci by bylo vhodné zařízení zkompletovat a provést na něm sérii testů. Bylo by vhodné změřit tlak proudícího média na vstupu a na výstupu v závislosti na průtoku a jeho teplotě, tím tedy i stanovit skutečné tlakové ztráty zařízení. Další testy bychom měli zaměřit na optimalizaci řídicího softwaru a na účinnost zařízení.

7 ZÁVĚR

Hlavním cílem této bakalářské práce bylo navrhnout modul pro zařízení SLM Solutions 280^{HL} v1.0, který umožňuje filtraci zbytkového kyslíku z inertní atmosféry během zpracování hořčíkových slitin. Čistota inertní atmosféry měla dosáhnout minimálně 99,9 %, který se podařilo splnit.

V úvodu práce byly vysvětleny výhody technologie Selective Laser Melting a její význam v nastupujícím průmyslu 4.0. Dále zde bylo popsáno, z jakého důvodu se zabýváme zpracováním hořčíkových slitin touto technologií a jaké výhody a možnosti to přináší.

Pro správný a účelný návrh filtru kyslíku bylo nutné pochopit jakým způsobem kyslík během zpracování hořčíkových slitin vzniká a jakým způsobem je možné kyslík z inertní atmosféry vyvést. To bylo studováno v kapitole současný stav poznání.

Analýzou celé problematiky bylo zjištěno, že zdrojem zbytkového kyslíku je vstupní surovina (hořčíkový prášek), avšak zejména kvůli bezpečnosti není vhodné prášek používat v nezoxidovaném stavu. Dále byly stanoveny cíle bakalářské práce.

V práci byly rozpracovány tři koncepční řešení, u kterých byla provedena analýza rizik. Z této analýzy vzešel jako nejvhodnější koncept 3. Tento koncept byl pak dále rozpracován.

Konstrukční řešení kyslíkového filtru bylo navrženo s ohledem na provozní parametry a stanovené cíle bakalářské práce. Povedlo se navrhnout zařízení, které splňuje všechny požadavky a stanovené cíle. Zařízení umožňuje filtrovat až 120 m³/h plynu s výstupní čistotou $\leq 100 \text{ ppt}$ ($1,0 \times 10^{-8} \%$). V práci byl také navržen řídicí program, který splňuje všechny požadavky, avšak bylo by ho vhodné dále optimalizovat a rozšířit o dodatečné funkce.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] ODBOR 31300, . Průmysl 4.0 má v Česku své místo: INICIATIVA PRŮMYSL 4.0. *Ministerstvo průmyslu a obchodu České republiky* [online]. 2020 [cit. 2020-03-31]. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/assets/dokumenty/53723/64358/658713/priloha001.pdf>
- [2] KOHÁR, Róbert, Rudolf MADAJ, Róbert SÁSIK a Igor GAJDÁČ. *Rapid prototyping technológie*. 1. vydanie. Žilina: EDIS-vydavateľské centrum ŽU, 2018, 237 stran : ilustrace (některé barevné). ISBN 978-80-554-1519-2.
- [3] YAP, C., C. CHUA, Z. DONG, Z. LIU, D. ZHANG, L. LOH a S. SING. Review of selective laser melting: Materials and applications. *Applied Physics Reviews* [online]. 2015, **2**(4), 1-22 [cit. 2020-03-30]. DOI: 10.1063/1.4935926. ISSN 1931-9401. Dostupné z: <http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.4935926>
- [4] IRINEL, Băilă. Medical Implants Realized from the Sintered Compacts of Titan-Hydroxyapatite. *Procedia Engineering* [online]. 2014, **69**, 594-596 [cit. 2020-04-12]. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.03.030. ISSN 18777058. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877705814002768>
- [5] MEDICAL APPLICATIONS OF TITANIUM AND ITS ALLOYS : THE MATERIAL AND BIOLOGICAL ISSUES (1194 : PHOENIX, USA), Stanley BROWN a Jack LEMONS. *Medical applications of titanium and its alloys: the material and biological issues*. West Conshohocken: ASTM, 1996, xii, 421 stran : ilustrace. ISBN 0-8031-2010-9.
- [6] YUAN, Li, Songlin DING a Cuie WEN. Additive manufacturing technology for porous metal implant applications and triple minimal surface structures: A review. *Bioactive Materials* [online]. 2019, **4**, 56-70 [cit. 2020-04-12]. DOI: 10.1016/j.bioactmat.2018.12.003. ISSN 2452199X. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2452199X18300768>
- [7] STAIGER, Mark, Alexis PIETAK, Jerawala HUADMAI a George DIAS. Magnesium and its alloys as orthopedic biomaterials: A review. *Biomaterials* [online]. 2006, **27**(9), 1728-1734 [cit. 2020-04-12]. DOI: 10.1016/j.biomaterials.2005.10.003. ISSN 01429612. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0142961205009014>

- [8] KARUNAKARAN, Rakeshkumar, Sam ORTGIES, Ali TAMAYOL, Florin BOBARU a Michael SEALY. Additive manufacturing of magnesium alloys. *Bioactive Materials* [online]. 2020, **5**(1), 44-54 [cit. 2020-04-12]. DOI: 10.1016/j.bioactmat.2019.12.004. ISSN 2452199X. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2452199X19300726>
- [9] LI, Y., H. JAHR, X-Y. ZHANG et al. Biodegradation-affected fatigue behavior of additively manufactured porous magnesium. *Additive Manufacturing* [online]. 2019, **28**, 299-311 [cit. 2020-04-14]. DOI: 10.1016/j.addma.2019.05.013. ISSN 22148604. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2214860418310133>
- [10] SLM ® KOVOVÝ PRÁŠEK: SLM SOLUTIONS METAL POWDER & MATERIAL PARAMETERS - KVALIFIKACE. *SLM SOLUTIONS* [online]. © 2018-2019 [cit. 2020-03-30]. Dostupné z: <https://www.slm-solutions.com/en/products/accessories-consumables/slmr-metal-powder/>
- [11] *Rapid Prototyping Journal* [online]. 2011, [cit. 2020-04-03]. ISSN 1355-2546.
- [12] CHEN, Qiang, Gildas GUILLEMOT, Charles-André GANDIN a Michel BELLET. Three-dimensional finite element thermomechanical modeling of additive manufacturing by selective laser melting for ceramic materials. *Additive Manufacturing* [online]. 2017, **16**, 124-137 [cit. 2020-03-30]. DOI: 10.1016/j.addma.2017.02.005. ISSN 22148604. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2214860416302317>
- [13] NG, C., M. SAVALANI, H. MAN a I. GIBSON. Layer manufacturing of magnesium and its alloy structures for future applications. *Virtual and Physical Prototyping* [online]. 2010, **5**(1), 13-19 [cit. 2020-03-30]. DOI: 10.1080/17452751003718629. ISSN 1745-2759. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/17452751003718629>
- [14] SALEHI, Mojtaba, Saeed MALEKSAEEDI, Hamidreza FARNOUSH, Mui NAI, Ganesh MEENASHISUNDARAM a Manoj GUPTA. An investigation into interaction between magnesium powder and Ar gas: Implications for selective laser melting of magnesium. *Powder Technology* [online]. 2018, **333**, 252-261 [cit. 2020-03-30]. DOI: 10.1016/j.powtec.2018.04.026. ISSN 00325910. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0032591018302985>
- [15] SLM ® 280: SLM ® 280 PRODUKČNÍ ŘADA. *SLM SOLUTIONS* [online]. © 2018-2019 [cit. 2020-03-30]. Dostupné z: <https://www.slm-solutions.com/products/machines/slmr280/>
- [16] SLM 280 HL. *Boris Kolář K&K* [online]. Praha 9, 2016 [cit. 2020-03-30]. Dostupné z: <http://www.kolarkk.cz/index.php/slm/51-slm-zarizeni/163-slm-280-hl>

- [17] DREIZIN, Edward, Charles BERMAN a Edward VICENZI. Condensed-phase modifications in magnesium particle combustion in air. *Combustion and Flame* [online]. 2000, **122**(1-2), 30-42 [cit. 2020-03-30]. DOI: 10.1016/S0010-2180(00)00101-2. ISSN 00102180. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0010218000001012>
- [18] JAUER, Lucas, Wilhelm MEINERS, Simon VERVOORT, Christoph GAYER, Naemi ZUMDICK a Daniela ZANDER. *European Congress and Exhibition on Powder Metallurgy. European PM Conference Proceedings* [online]. Shrewsbury: The European Powder Metallurgy Association, 2016, 2019-02-27, 1-6 s. [cit. 2020-04-01]. Dostupné z: <https://search.proquest.com/docview/2036730696?accountid=17115>
- [19] ABEL, Lois, ed. *ASM handbook: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*. Vol. 2. Materials Park: ASM International, 1990. ISBN 978-0-87170-378-1.
- [20] *Rozhovor s Ing. Janem Suchým: vedoucí bakalářské práce: Návrh kyslíkového filtru do 3D tiskárny kovů*. VUT FSI v Brně: 13.02.2020.
- [21] SPECIÁLNÍ PRODUKTY. *Luxfer Magtech* [online]. 2018 [cit. 2020-04-03]. Dostupné z: <https://luxfermagtech.com/our-products/specialty-products/>
- [22] CZERWINSKI, F. The oxidation behaviour of an AZ91D magnesium alloy at high temperatures. *Acta Materialia* [online]. 2002, **50**(10), 2639-2654 [cit. 2020-03-30]. DOI: 10.1016/S1359-6454(02)00094-0. ISSN 13596454. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359645402000940>
- [23] GREENWOOD, N. a Alan EARNSHAW. *Chemie prvků*. 1. vyd. Praha: Informatorium, 1993. ISBN isbn80-85427-38-9.
- [24] VOHLÍDAL, Jiří a Karel ŠTULÍK. *Chemické a analytické tabulky*. Vyd. 1. Praha: Grada, 1999. ISBN isbn80-7169-855-5.
- [25] KAINER, K. a Frank KAISER. *Magnesium alloys and technologies*. Weinheim: Wiley-VCH, 2003, viii, 285 s. : il. ISBN 3-527-30570-X.
- [26] PRISM® PA nitrogen membrane separators. *Air Products and Chemicals, Inc.* [online]. 2020 [cit. 2020-03-30]. Dostupné z: <http://www.airproducts.com/~media/downloads/data-sheets/P/prism-pa-nitrogen-membrane-separators.pdf?la=en>

- [27] Trapy pro odstranění kyslíku: Spotřební materiál a laboratorní vybavení. *HPST* [online]. 2020 [cit. 2020-03-30]. Dostupné z: <https://www.labicom.cz/produkty/spotrebni-material/plynova-chromatografie-prislusenstvi/trapy-pro-cisteni-plynu/trapy-pro-odstraneni-kysliku>
- [28] GateKeeper® GPU 13M 12R Gas Purifiers. *Entegris* [online]. Billerica (Massachusetts): Entegris, © 1994-2020 [cit. 2020-06-16]. Dostupné z: <https://www.entegris.com/content/dam/product-assets/gatekeepergpugaspurifiers/datasheet-gatekeeper-gpu-13m-12r-16r-8058.pdf>
- [29] Agilent Technologies, Inc. GENERAL CHROMATOGRAPHY: Your Essential Resource for Supplies. *Agilent Technologies, Inc.* [online]. Canada, 2020 [cit. 2020-03-30]. Dostupné z: <https://www.agilent.com/cs/library/catalogs/public/5991-1056EN%20General%20Catalog.pdf>
- [30] Analýza rizik. <https://www.braintools.cz/> [online]. Olomouc: Brain Tools Group, © 2014-2020 [cit. 2020-06-16]. Dostupné z: https://www.braintools.cz/toolbox/zvladani-rizik/jak-analyzovat-rizika.htm?fbclid=IwAR0IxTO8DrbgZad-c5o7LZKBsFW0oGpSyTE5_9qxe1gAE0ExL8JRBfCRM3Q
- [31] Trubky a montážní příslušenství. *AWH: NEUMO Ehrenberg Group* [online]. Hötensleben: Armaturenwerk Hötensleben GmbH, 2015 [cit. 2020-06-17]. Dostupné z: <https://www.awh.eu/cz/vyrobky/trubky-a-montazni-prislusenstvi.html>
- [32] Flanges and Fittings. *Oerlikon* [online]. Oerlikon, 2020 [cit. 2020-06-17]. Dostupné z: https://www.leyboldproducts.com/media/pdf/8e/c6/3f/CP_080_Fittings_EN57beb2d4b36d0.pdf
- [33] Online kalkulačka poklesu tlaku. *SF Pressure Drop* [online]. Schifferstadt: Software-Factory H. Schmitz [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: <http://www.pressure-drop.com/Online-Calculator/>
- [34] ARMATURENWERK HÖTENSLEBEN GMBH, . AWH: NEUMO Ehrenberg Group. *Ventilová technika* [online]. b.r. [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: <https://www.awh.eu/cz.html>
- [35] Fluidní kalkulačka: S fluidní kalkulačkou můžete spolehlivě a jednoduše vypočítat hodnoty Kv, průtoky a tlakové ztráty. *Bürkert: FLUID CONTROL SYSTEMS* [online]. Bürkert [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: <https://www.burkert.cz/cz/Servis-a-podpora/podpora/Glosar/Fluidni-kalkulacka>
- [36] BUSCHJOST 82540 SERIES. *NORGREN* [online]. Lichfield: Norgren [cit. 2020-06-17]. Dostupné z: <http://static.linhorn.com/products/oldl/files2016322113937343684040.pdf>

- [37] TecControl: průmyslový senzor koncentrace O₂. *D-Ex* [online]. Brno: D-Ex Instruments, 2020 [cit. 2020-06-16]. Dostupné z: <https://www.dex.cz/produkt/teccontrol-prumyslovy-senzor-koncentrace-kysliku/#totab4>
- [38] TecInterface: digitální / analogový převodník. *D-Ex* [online]. Brno: D-Ex Instruments, 2020 [cit. 2020-06-16]. Dostupné z: <https://www.dex.cz/produkt/tecinterface-digitalni-analogovy-prevodnik/#totab3>
- [39] Dýchací vzduchové výrobky, spojky a bradavky: Série 441. *Cejn: The Quick Connect Solution Provider* [online]. Skövde: Cejn, 2020 [cit. 2020-06-16]. Dostupné z: <https://www.cejn.com/products/breathing-air/couplings-nipples/series-441/>
- [40] LOGO!: velké možnosti v malém balení. *SIEMENS: legennity for life* [online]. Siemens Česká republika, 2020 [cit. 2020-06-16]. Dostupné z: <https://new.siemens.com/cz/cs/products/automation/systems/industrial/plc/logo.html>
- [41] LOGO! Software. *SIEMENS: legennity for life* [online]. Siemens Česká republika, 2020 [cit. 2020-06-16]. Dostupné z: <https://new.siemens.com/global/en/products/automation/systems/industrial/plc/logo/logo-software.html>

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

<i>SLM</i>	Selective Laser Melting
<i>CAD</i>	Computer aided design
<i>PLC</i>	Programmable Logic Controller
<i>DC</i>	direct current
<i>DIN</i>	Deutsche Industrie–Norm
<i>ISO</i>	International Organization for Standardization
<i>CMR</i>	Communication Module Radio
<i>CSM</i>	Compact Switch Module
<i>CMK</i>	Communication Module with KNX
<i>KNX</i>	mezinárodně normalizovaný systém programovatelných elektrických instalací
<i>LWE</i>	LOGO! Web Editor
<i>CF</i>	Compact Flash
<i>IP67</i>	Ingress Protection 67
<i>PC</i>	personal computer
<i>ppt</i>	parts per trillion (částic na bilion)
<i>ppm</i>	parts per million (částic na million)
<i>K_v</i>	jmenovitý průtokový součinitel
<i>psi (PSI)</i>	libra na čtvereční palec
<i>psig</i>	libra na čtvereční palec (měřeno relativně)
<i>cfm (CFM)</i>	kubická stopa za minutu
<i>slpm (SLM)</i>	standardní litr za minutu
<i>Ra</i>	střední aritmetická úchylka profilu

10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

obr. 2-1 Schéma Technologie Selective Laser Melting (SLM) [3]	17
obr. 2-2 Schéma vrstvení materiálu během stavebního procesu [3]	17
obr. 2-3 Proudění inertní atmosféry před optimalizací (nalevo) a po optimalizaci (napravo) [18]	18
obr. 2-4 Nejdůležitější parametry ovlivňující výrobní proces [1]	19
obr. 2-5 Schéma současného uspořádání zařízení SLM Solution 280 ^{HL} v1.0 na FSI VUT v Brně, spalinový filtr (červená)	20
obr. 2-6 Kulovitý tvar částic atomizované hořčkové slitiny WE43C [21].....	21
obr. 2-7 Časový vývoj oxidace hořčíku za zvýšených teplot.....	22
obr. 2-8 Graf závislosti hmotnostního přírůstku a teploty [13].....	23
obr. 2-9 Tavný kužel vznikající při působení laseru.....	24
obr. 2-10 Detail struktury Membrány Prism [23]	25
obr. 2-11 Relativní rychlost propustnosti jednotlivých plynů [26].....	25
obr. 2-12 Schéma membránového separátoru PRISM [26].....	26
obr. 2-13 Velká kyslíková past [26].....	27
obr. 2-14 Indikační kyslíková past [26].....	27
obr. 4-1 Konceptní řešení s manuálním ovládáním ventilu a vizuální kontrolou.....	30
obr. 4-2 Konceptní řešení s manuálním ovládáním ventilu a kyslíkovým čidlem	31
obr. 4-3 Konceptní řešení s automatickým ovládáním ventilu a kyslíkovým čidlem	32
obr. 5-1 Schéma umístění kyslíkového filtru do stávajícího systému SLM Solution 280 ^{HL} v1.0	37
obr. 5-2 Konstrukce kyslíkového filtru (1 - černá) rám, (2 - zelená) ovládané ventily, (3 - červená) kyslíkové pasti, (4 - fialová) přímo ovládaný solenoidový ventil, (5 - hnědá) senzor kyslíku, (6 - modrá) prvky potrubí, (7 - růžová) řídicí jednotka Logo Soft, (8 - oranžová) rychlospojky.....	38
obr. 5-3 Schéma režimu napouštění inertní atmosféry, otevřeno (zelená), uzavřeno (červená), proudící plyn (modrá).....	39
obr. 5-4 Schéma režimu filtrace zbytkového kyslíku, otevřeno (zelená), uzavřeno (červená), proudící plyn (modrá), průtok umožněn a výfuk uzavřen (oranžová).....	40

obr. 5-5 Schéma režimu výměny vyčerpané kyslíkové pasti, výfuk a průtok otevřen (zelená), uzavřeno (červená), proudící plyn (modrá).....	41
obr. 5-6 Schéma vakuové spojky ISO KF [32].....	42
obr. 5-7 Výstup z webového softwaru tlakových ztrát v kolenu [40]	43
obr. 5-8 Výstup z webového softwaru tlakových ztrát v T-kusu [40].....	43
obr. 5-9 Výstup z webového softwaru tlakových ztrát v přímých částech potrubí [40]	44
obr. 5-10 Uzavírací mezi-přírubová klapka s elektrickým pohonem [34]	45
obr. 5-11 Výstup z webového softwaru tlakových ztrát klapky [35]	45
obr. 5-12 Schéma přímo ovládaného solenoidového ventilu [36]	46
obr. 5-13 Výstup z webového softwaru tlakových ztrát přímo ovládaného solenoidového ventilu [35]	46
obr. 5-14 Kyslíkový senzor TecControl [37]	47
obr. 5-15 Schéma digitálního/analogového převodníku TecInterface [38].....	47
obr. 5-16 Graf zobrazující závislost mezi průtokem vzduchu l/min (CFM) na horizontální ose a mezi tlakovou ztrátou bar (PSI) na vertikální ose [39].....	48
obr. 5-17 Uspořádání modulů Logo! v kyslíkovém filtru	49
obr. 5-18 Schéma řídicího programu vytvořeného v Logo!Soft Comfort v8.2 Demo, mód napouštění inertní atmosféry (červená), mód filtrace zbytkového kyslíku (oranžová), mód výměny vyčerpané kyslíkové pasti (modrá), zpracování analogového vstupu od senzoru kyslíku (z.....	50
obr. 5-19 Schéma sepnutého módu napouštění inertní atmosféry, Booleovská 1 (červená), Booleovská 0 (modrá)	51
obr. 5-20 Schéma sepnutého módu napouštění inertní atmosféry, Booleovská 1 (červená), Booleovská 0 (modrá)	52
obr. 5-21 Schéma sepnutého módu výměny vyčerpané kyslíkové pasti, Booleovská 1 (červená), Booleovská 0 (modrá)	53
obr. 5-22 Umístění Dvojitého T-kusu v sestavě kyslíkového filtru (červená).....	54
obr. 5-23 Úprava normalizovaného křížového kusu do dvojitého T-kusu.....	54
obr. 5-24 Konstrukce a umístění konfuzoru v sestavě kyslíkové filtru (červená).....	55
obr. 5-25 Výstup z webového softwaru tlakových ztrát v konfuzoru [33]	55
obr. 5-26 Konstrukce a umístění difuzoru v sestavě kyslíkové filtru (červená)	56
obr. 5-27 Výstup z webového softwaru tlakových ztrát v difuzoru [33]	56

obr. 5-28 Konstrukce a umístění přechodky v sestavě kyslíkové filtru (červená)	57
obr. 5-29 Schéma umístění prvků vystupujících ve výpočtu tlakových ztrát.....	58

11 SEZNAM TABULEK

tab. 2-1 Tabulka vybraných technických parametrů zařízení SLM 280 ^{HL} [15] [16] [20]	20
tab. 2-2 Vybrané fyzikální vlastnosti hořčíku (Mg) [23] a oxidu hořečnatého (MgO) [24] [25]	22
tab. 4-1 Pravděpodobnost výskytu rizika [30].....	33
tab. 4-2 Významnost vlivu a dopad rizika [30]	33
tab. 4-3 Stanovení rizik konceptu 1, běžné riziko 0-8 (zelená), závažné riziko 9-15 (žlutá), kritické riziko 16-25 (červená).....	34
tab. 4-4 Stanovení rizik konceptu 2, běžné riziko 0-8 (zelená), závažné riziko 9-15 (žlutá), kritické riziko 16-25 (červená).....	35
tab. 4-5 Stanovení rizik konceptu 3, běžné riziko 0-8 (zelená), závažné riziko 9-15 (žlutá), kritické riziko 16-25 (červená).....	36
tab. 5-1 Tabulka provozních parametrů zařízení SLM Solution 280 ^{HL} [20].....	37
tab. 5-2 Specifikace GateKeeper GPU 13M 12R [28].....	48
tab. 5-3 Tabulka celkových tlakových ztrát módu filtrace zbytkového kyslíku	58

12 SEZNAM PŘÍLOH

3D dokumentace zařízení v programu Autodesk Inventor Professional 2020

Řídící program v programu Logo!Soft Comfort v8.2

Výkres sestavy zařízení